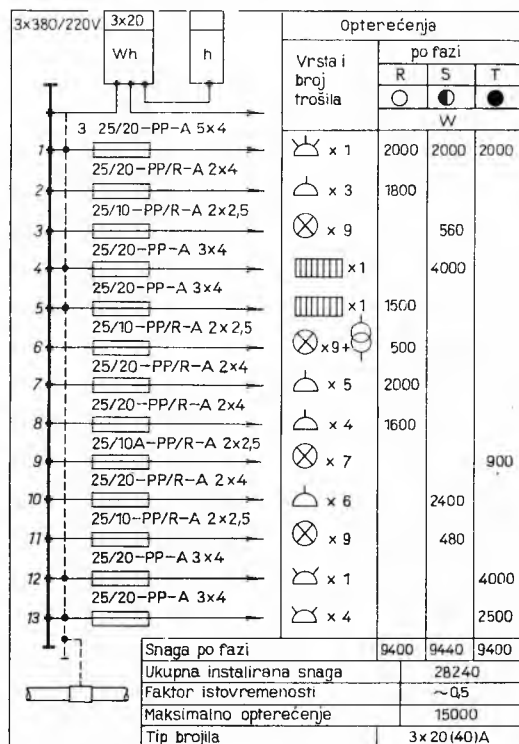


ne i stambene) razvodne ploče. Na shemi glavne razvodne ploče prikazani su shematski: dužine trasa linija od glavnog osigurača do osigurača na katnoj razvodnoj ploči, broj vodova, presjek vodiča, vrsta izolacije, promjer izabrane cijevi i instalirana snaga prema kojoj je izračunan presjek vodiča. Na shemama drugih (katnih) razvodnih ploča (sl. 48) shematski su prikazani osigurači



Sl. 48. Shema i podaci za katnu razvodnu ploču

i priključci pojedinih krugova, karakteristike pojedinih vodova i način zaštite. Obično se u sklopu ove sheme dodaje tablica u kojoj su s pomoću simbola naznačena trošila svakog pojedinog kruga, njihov broj i opterećenje po pojedinim fazama.

Proračun presjeka pojedinih vodiča i odabiranje najprikladnijih tipova vodova vrši se prema načelima koja su iznijeta u prethodnom poglavlju.

Dodatne sheme veza služe za bolje razumijevanje pojedinih detalja ili pojedinih dijelova instalacije, a izrađuju se i za one

veze koje treba postaviti van uobičajenih standardiziranih instalacija. Ove se sheme crtaju bilo kao jednopolne sheme, sheme djelovanja, strujne sheme ili kao priključne sheme. *Jednopolna shema* (sl. 49 a) jednopolno pokazuje glavne i pomoćne vodove koji su prijeko potrebni za razumijevanje instalacije. Na shemi upisani su i osnovni električni podaci o aparatima i trošilima, a prikazan je i njihov raspored na polja, ćelije, ormariće itd. *Shema djelovanja* (sl. 49 b) sadrži sve vodove, aparate i trošila s njihovim električnim podacima, kao i sve podatke potrebne za praćenje djelovanja svih strujnih krugova. *Strujna shema* (sl. 49 c) služi za prikaz pomoćnih strujnih krugova kojima se vrši upravljanje ili signalizacija. Kontakti koji pripadaju istom aparatu crtaju se razdvojeno, uklopljeni u pripadajuće strujne krugove. Odgovarajućim brojevano-slovnim oznakama naznačuje se koji kontakti pripadaju pojedinom aparatu. Svi strujni krugovi crtaju se između dvije horizontalne linije, koje predstavljaju vodove s pomoćnim naponom, prema redoslijedu uklapanja s lijeva na desno. Na strujnoj shemi izbjegavaju se sva križanja linija. *Priključna shema* služi kao izvedbeni nacrt i prikazuje priključivanje vodiča na stezaljke razvodnog uređaja, trošila ili aparata. Iz te sheme nije neposredno vidljivo funkcioniranje instalacije.

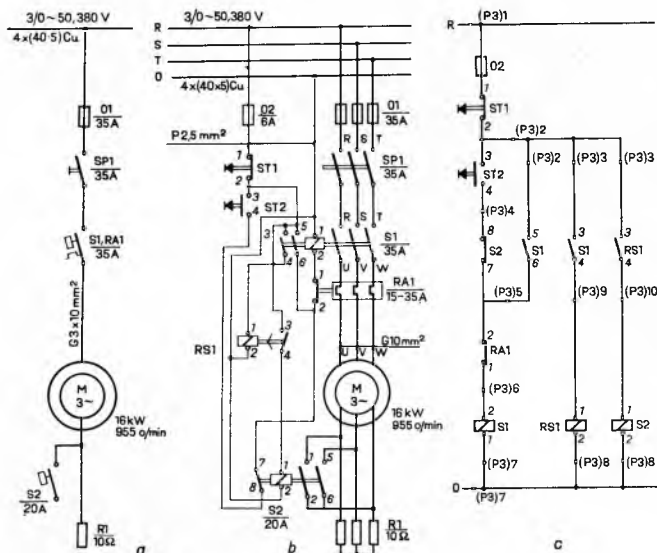
Tehnički opis je pismeni sastav koji se daje uz projekt, a služi za upoznavanje izvođača instalacije sa zamislima projektanta. U njemu su neke eventualne nejasnoće nedvosmisleno i po potrebi detaljnije objašnjene.

Tehnički uvjeti koji se prilažu projektu pismeni su sastav u kome su citirani svi propisi kojih se treba pridržavati pri izvođenju instalacije i standardi kojima treba da odgovara instalacijski materijal. U njemu se daju i definicije sadržaja pojedinih tačaka predračuna.

LIT.: W. S. Ibbetson, Numerical exercises in electric wiring, London 1948. — J. H. Nowak, Practical residential wiring, New York 1948. — A. Uhl, C. H. Dunlap, F. W. Flynn, Interior electric wiring and estimating, Chicago 1951. — H. P. Richter, Practical electric wiring, New York 1952. — B. Z. Segall, Electric code diagrams, New York 1954. — A. L. Abbot, National electric code handbook, New York 1954. — W. S. Ibbetson, Electric wiring: theory and practice, London 1954. — D. Matanović, Zaštitne mjere u električnim uređajima, Zagreb 1960. — AEG (Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft), Hilfsbuch für Licht- und Kraftanlagen, Essen 1960. — R. Arnold, Taschenbuch für Elektriker, Berlin 1962. — Tvornica Rade Končar, Tehnički priručnik, Zagreb 1963. — A. Hoppner, Handbuch für Planung, Konstruktion und Montage von Schaltanlagen, Mannheim 1964. — D. Kaiser, Elektrotechnischer priručnik, Zagreb 1964. — D. Lj. Petrović, Električne instalacije, Beograd 1968. — A. J. Coker, Electric wiring (domestic), London 1969. — M. Neidle, Electrical installation technology, London 1970. V. Srb

ELEKTRIČNE MREŽE, jakostrujne, o kojima će isključivo biti govora u ovom članku, predstavljaju skupove svih međusobno spojenih električnih postrojenja i vodova (dalekovoda i kabela) istog nazivnog napona. One služe za transport električne energije od njezina izvora do potrošača. Prema nazivnom naponu (kojim se one označuju i koji ih karakterizira) električne se mreže dijele obično na mreže niskog, srednjeg, visokog i najvišeg napona. Granice pri ovoj klasifikaciji leže otprilike pri 1, 35 i 150 kV. Električne mreže mogu prema svojoj namjeni služiti ili prenosu (transportu) ili razdiobi (distribuciji) električne energije. Mreže za prenos povezuju velike elektrane s velikim potrošačkim centrima i elektrane među sobom. U ovim se mrežama primjenjuju samo visoki i najviši naponi (npr. 110, 220 kV) i njima se prenose velike snage često na velike udaljenosti. Mreže za distribuciju povezuju lokalne izvore električne energije (manje elektrane, transformatorske stanice potrošačkih centara napajane mrežom za prenos električne energije) s pojedinim potrošačima (zgradama, tvornicama itd.). U tim se mrežama primjenjuju srednji (npr. 10 i 35 kV) i niski naponi (manji od 1 kV, u gradskim i tvorničkim mrežama) i njima se prenose samo manje snage na manje udaljenosti. Često je teško povući granicu između mreže za prenos i mreže za razdiobu. (Opća teorija mreža obrađena je u članku *Električni krugovi*.)

Razvoj jakostrujnih električnih mreža. Nakon izuma električnog generatora (W. v. Siemens 1866) i nakon što je Th. A. Edison 1879 uspio proizvesti upotrebljive žarulje, počela je 1882 izgradnja električnih centrala. To su bila postrojenja s parnim strojem koji je s pomoću remenskog prenosa pogonio mali generator istosmjernje struje. Takve su se električne centrale u početku upotrebljavale isključivo za napajanje rasvjetne mreže u većim stambenim i poslovnim zgradama. Žarulje bile su u tim instala-



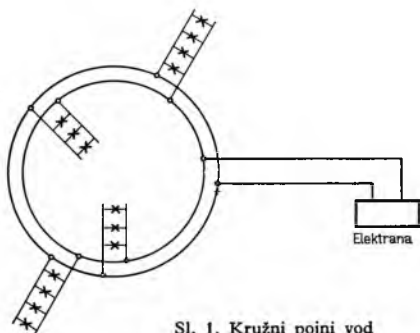
Sl. 49. Dodatni instalacijski nacrti trofaznog kolutnog asinhronog motora: a jednopolna shema, b shema djelovanja, c strujna shema

cijama spojene paralelno na dvožilne vodove; više takvih vodova, koji su dolazili iz različitih dijelova zgrade, bilo je priključeno na vertikalni vod ili izravno na generator.

Električne žarulje, koje su u prvo vrijeme bile jedina trošila električnih mreža, vrlo su osjetljive prema promjenama napona. Naponi viši od nazivnog, za koji su one konstruirane, smanjuju im vijek trajanja, a niži naponi svjetlosni tok (v. *Električno osjetljenje*). Za napajanje žarulja potreban je stoga napon koji se ne mijenja za više od $\pm 4\%$. Uzme li se u obzir ovo ograničenje i najekonomičnija gustoća struje u vodu, može se s pomoću tih veličina izračunati i najveća dozvoljena duljina voda koji napaja žarulje. Fizičar W. Thomson (kasnije lord Kelvin, 1824–1908) izračunao je da je transport električne energije najrentabilniji pri gustoći struje $1,2 \text{ A/mm}^2$. Iz tih se podataka dobije da duljina voda pri nazivnim naponima mreže: 65, 110, 165 i 220 V smije iznositi otprilike samo 65, 110, 165 i 220 m.

U vrijeme kućnih električnih centrala mrežnog napona 65, 110 ili 165 V najveća duljina vodova od centrale u podrumu do žarulja na gornjim katovima nije prekoračivala naprijed navedene vrijednosti. Međutim, kad su, radi izbjegavanja buke i dima u kućama i zbog veće ekonomičnosti većih centrala, počeli pomišljati na povećanje centrala i njihovo premještanje na periferiju grada, trebalo je najprije riješiti problem povećanja njihovog akcijskog polumjera.

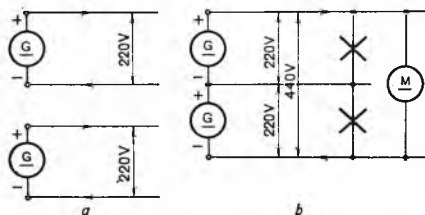
Kao prvo rješenje tog problema počeli su se primjenjivati *kružni pojni vodovi*. To su bila dva vodiča postavljena kružno oko centra područja koje je trebalo opskrbljivati električnom energijom. Polumjer tog kruga bio je jednak udaljenosti koja je upravo još prihvatljiva pri izabranom mrežnom naponu. Na vodiče ovog prstenastog pojnog voda (koji predstavlja u neku ruku produženje stezaljki generatora) priključeni su vodovi za napajanje trošila (sl. 1). Oni vode na obje strane prema unutra i van,



Sl. 1. Kružni pojni vod

a električna se centrala sada već nalazi izvan područja snabdijevanja. Napon na pojnom vodu održava se stalno na nazivnoj vrijednosti regulacijom napona generatora. Ovaj je sistem omogućio udvostručenje akcijskog polumjera električne centrale.

Dalji je napredak u pogledu povećanja akcijskog polumjera tadašnjih istosmjernih električnih centrala postignut *trožilnim sistemom*, koji se može zamisliti kao kombinacija dvaju

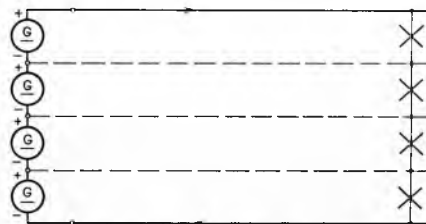


Sl. 2. Trožilni sistem. a Dva dvožilna sistema, b kombinacija dvaju dvožilnih sistema

jednakih istosmjernih dvožilnih sistema u kojima dva generatora svaki preko svog dvožilnog voda napajaju svoja trošila (sl. 2 a). Ako se odvodna žila prvog sistema upotrijebi kao dovodna žila drugog sistema, ako su struje u oba sistema jednake a u zajedničkom vodiču po smjeru suprotne (sl. 2 b), u tom vodiču je, bar teoretski, ukupna struja jednaka nuli. Izgleda kao da je treća žila

uopće suvišna, jer u njoj ne teče nikakva struja, pa bi se njenim ispuštanjem moglo uštediti 50% bakra, a i gubici napona smanjili bi se na polovinu. Međutim, i ako se na svaku polovinu sistema (koji radi npr. s naponom 220 V) priključi isti broj žarulja, a velika trošila (npr. motori), koja su konstruirana za napon dvostruko veći od nazivnog napona žarulja (npr. za 440 V), spoje radi simetričnog opterećenja na pozitivni i negativni vod, u praksi se ne može postići da struja u zajedničkom vodu bude uvijek jednaka nuli. Stoga se mora pri primjeni tog sistema uvijek predvidjeti i treći, tzv. neutralni ili nulti vodič kojemu presjek iznosi samo 16–25% od presjeka glavnih vodiča. Nulti se vodič u ovom sistemu obično i uzemljuje. Primjenom trožilnog sistema može se akcijski polumjer električne centrale povećati na nešto manje od dvostrukog.

U gradskim mrežama tog vremena primjenjivala se često i kombinacija trožilnog sistema sa sistemom pojnog voda. Na tom



Sl. 3. Princip petožilnog sistema

je principu bila npr. izgrađena istosmjerna električna mreža Ljubljane (1895). Kako *petožilni sistem* (sl. 3), koji predstavlja kombinaciju četiriju dvožilnih sistema, nije zbog niza nedostataka doživio širu primjenu, može se smatrati da trožilni sistem kombiniran sa sistemom pojnog voda predstavlja praktički završnu fazu u prenosu energije s pomoću istosmjerne struje, bar za taj period razvoja električnih mreža.

Do velikog preokreta u prenosu električne energije došlo je nakon izuma transformatora i trofazne struje.

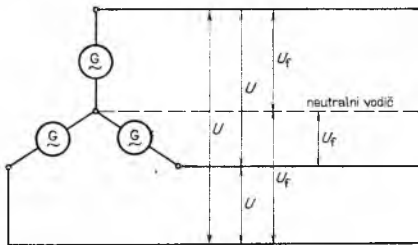
Tek transformator, koji je izumljen 1885 (v. *Transformator*), omogućio je ekonomičan prenos većih količina električne energije i na veće udaljenosti uz upotrebu izmjenične struje. Pri prenosu električne energije vrši se transformacija napona dva ili više puta. Na izlazu iz elektrane napon se generatora transformira na viši pogonski napon dalekovoda (uz smanjenje jakosti struje), a u udaljenom potrošačkom centru napon se dalekovoda (uz povećanje jakosti struje) opet snizuje na napon mreže za razdiobu električne energije potrošačima. Takvim se postupkom postiže smanjenje gubitaka i smanjenje relativnog pada napona, što omogućuje povećanje akcijskog polumjera elektrana od ranijih 200, 1000 ili 2000 m na 10, 100, 500 ili više kilometara.

Sposobnosti transformatora rastle su, naravno, u toku godina samo postepeno. U prvim godinama primjene transformatora napon je na dalekovodima iznosio 5–10 kV, a korisnost im je bila niska. Danas su normalni nazivni naponi prenosnih mreža 110, 220 i 380 kV, a pojedinačno su u primjeni i naponi do 750 kV.

Jednofazna izmjenična struja, u obliku koje se mogla prenositi energija na veće udaljenosti, mogla se uspješno upotrijebiti za napajanje mreža električne rasvjete, jer su joj tada upotrebljavane frekvencije (42, 50 i 60 Hz) bile više od minimalne frekvencije (25 Hz) potrebne da oko ne bi osjećalo treperenje svjetla (v. *Električno osjetljenje*). Ali veliki nedostatak, koji je sprečavao njezino definitivno uvođenje, bio joj je što ona nije bila prikladna za pogon tada poznatih tipova elektromotora.

Naš zemljak N. Tesla izumio je najprije dvofaznu, a zatim trofaznu struju (1887), koja je vrlo prikladna za pogon asinhronih motora (v. *Električni strojevi*). Trofazni sistem može se zamisliti kao spoj triju jednofaznih sistema u kojima teku jednofazne izmjenične struje među kojima postoji određeni fazni pomak (120 električnih stupnjeva) i određeni redoslijed. U simetričnom trofaznom sistemu suma struja u svakom je trenutku jednaka nuli. Spoje li se povratni vodiči svih triju sistema u jedan zajednički povratni (neutralni, nulti) vodič, on se pri simetričnom pogonu kakav postoji na dalekovodima mreža za prenos može ispustiti, jer u njemu ne teče nikakva struja (trožilni trofazni vod). U

vodovima kojima opterećenje nije simetrično, kao npr. u razdjelnim mrežama, povratni se vod mora zadržati (četverožilni trofazni vod, sl. 4). Sistem trofaznog prenosa ima, dakle, sve prednosti što ih je pružao ranije opisani trožilni istosmjerni sistem. Ako se pri trofaznom niskonaponskom prenosu, kao što je sada uobičajeno, upotrijebe linijski naponi 380 V (između dva fazna vodiča) i fazni naponi 220 V (između pojedinih faznih vodiča i zemlje ili neutralnog vodiča) akcijski radijus iznosi 400...500 m.



Sl. 4. Trofazni sistem

Tek kad je N. Tesla pored trofaznog sistema izumio i vrlo upotrebljivi, lako pokretljivi i jeftini asinhroni motor, počele su se devedesetih godina postepeno umjesto mreža s istosmjernom strujom upotrebljavati mreže sa (dvo- i) trofaznom strujom.

Za transport električne energije na veće udaljenosti upotrijebljen je trofazni prenosni sistem prvi put u Njemačkoj (1891), gdje je dalekovodom napona 15 kV prenošena snaga ~150 kW između Laufena i Frankfurta na Majni (175 km) s korisnošću 75%.

Zanimljivo je primijetiti da se u prvoj električnoj mreži grada Zagreba, koja je izgrađena prema sugestijama samog N. Tesle 1907, vršio prenos između elektrane i 9 transformatorskih stanica u gradu također visokim naponom. Mreža je bila dvonaponska, 5000/500 V.

Visina upotrijebljenog trofaznog napona na dalekovodima za prenos električne energije brzo je rasla. U tom su pogledu vodile najprije USA pred drugim državama. Najpoznatiji bio je sistem 287 kV koji je povezivao elektranu na brani Boulder Dam s Los Angelesom. On je dugo bio jedini dalekovod tog napona na svijetu. U Švedskoj se 1952 prelazi na 380 kV, a u SSSR 1965 na 500 kV. U Kanadi izgrađen je iza toga prenosni sistem 700 kV. U međuvremenu prešle su i mnoge druge zemlje na 380 (400) i 500 kV.

U Jugoslaviji postojali su prije drugog svjetskog rata samo pojedinačni nepovezani dalekovodi razmjerno malog značaja. Najviši napon bio je 80 kV na potezu Fala—Laško u Sloveniji. Poslije rata prešlo se najprije na izgradnju jedinstvene 110 kV-ne mreže, koja je postepeno prekrila čitavu našu zemlju. U međuvremenu započeta je izgradnja mreže 220 kV, koja treba da također prekrije čitav teritorij zemlje, a dalekovodi 110 kV služiti će samo za odvojene mreže lokalnog značaja. Gotov je već i prvi dugo dalekovoda 400 kV za prenos električne energije iz hidroelektrane Đerdap. Istovremeno su postepeno ostvarene i elektroenergetske veze gotovo sa svim susjednim zemljama s pomoću dalekovoda na nivou 110 kV.

Prvi suvremeni istosmjerni prenos električne energije stavljen je u pogon 1954. Njime je ostvarena veza između kopna i otoka Gotland u Baltičkom moru (100 km) podmorskim kabelom, a upotrijebljen je napon 100 kV. Između Engleske i Francuske (52 km) položen je 1961 kabel za prenos električne energije; njegov pogonski napon iznosi 100 kV. Nakon toga počeo se primjenjivati prenos električne energije istosmjernom strujom visokog napona u SSSR i drugim zemljama. Pri ovom se sistemu prenosa napon struje što je daju trofazni generatori elektrane transformira na pogodni visoki napon, zatim se izmjenična struja ispravlja u istosmjernu struju visokog napona i dalekovodom ili kabelom vodi do svog odredišta, gdje se ona ponovo pretvara u izmjeničnu trofaznu struju. Moderni usmjerivački uređaji dozvoljavaju pri istosmjernom prenosu prelijevanje energije u jednom i drugom smjeru.

R.

MREŽE ZA PRENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE

Pod prenosom razumijeva se transport električne energije ako su posrijedi ili velike električne snage ili velike udaljenosti, ili i jedno i drugo. Energija se prenosi redovito od centra proizvodnje do centra potrošnje (a ne i do potrošača). Za taj transport služe visokonaponske mreže za transport električne energije. Svaka takva mreža obuhvaća sva međusobno spojena postrojenja i pripadne vodove istog nazivnog napona.

U ovom poglavlju bit će govora prvenstveno o problemima mreža za prenos električne energije, iako mnogo od iznijetog vrijedi i za mreže za razdiobu (distributivne mreže) koje su obrađene u idućem poglavlju.

Značenje mreže za prenos električne energije. Prenos električne energije danas je jedan od značajnih načina prenosa energije. On ima veoma veliko značenje jer omogućuje prenos energije i kad gotovo svi drugi načini prenosa energije (mehanički, pneumatski i sl.) zataje bilo iz tehničkih bilo iz ekonomskih razloga. Danas mu može konkurirati jedino neki od ekonomičnih načina transporta kvalitetnog ugljena i nafte, također transport nuklearnog goriva. No gorivo treba onda u centru konzuma pretvarati u pogodni oblik energije, obično u električnu energiju, što opet ima svoje nedostatke i poteškoće (potreba rashladne vode, zagađivanje atmosfere, opasnost). Tako i u tom slučaju dobre strane električnog prenosa energije dolaze do izražaja kao prednost.

U okviru elektroenergetskog sistema prenos električne energije također ima veliko značenje. U prvom redu njime je omogućena veza između elektrana (izvorâ električne energije) i potrošačkih centara. To omogućava izgradnju elektrana daleko od potrošača, gdje iskorištavaju vodne snage i nalazišta manje kvalitetnog ugljena. Nuklearne elektrane mogu se smjestiti podalje od gusto naseljenih područja na lokacije gdje ima dovoljno rashladne vode. Činjenica da se iz istog izvora može električna energija prenositi u različite potrošačke centre dozvoljava veliku koncentraciju snage u pojedinim agregatima za proizvodnju električne energije, odnosno u pojedinim elektranama u cjelini, što je ekonomički povoljno i u izgradnji i u pogonu.

Prenos električne energije omogućuje, nadalje, povezivanje elektrana i time njihovo ekonomičnije iskorištavanje. To dolazi do izražaja pri povezivanju elektrana različitih pogonskih karakteristika, naročito pri povezivanju hidroelektrana i termoelektrana. Elektrane se tada mogu međusobno dopunjavati. U doba malih voda termoelektrane preuzimaju veći dio tereta, a u doba velikih voda teret uglavnom preuzimaju hidroelektrane, pa se u pojedinim termoelektranama može u potpunosti ili djelomično obustaviti pogon radi redovitog remonta ili radi uštede na gorivu.

Povezivanjem većeg broja elektrana i većeg broja potrošačkih centara putem dalekovoda za prenos električne energije omogućuje se stvaranje velikih elektroenergetskih sistema. (Elektroenergetski sistem sjeverozapadnog dijela SR Hrvatske prikazuje sl. 5.) Time se povećava sigurnost snabdijevanja potrošača, koji više ne ovise samo o jednom izvoru električne energije. Ujedno se u čitavom sistemu može vršiti ekonomičniji pogon time što se ukupne potrebe potrošača u svakom trenutku pokrivaju iz onih elektrana koje su u danoj situaciji najekonomičnije. Konačno se znatno smanjuje potreba za instaliranom rezervnom snagom, jer će po zakonu vjerojatnosti to manji postotak elektrana ili agregata biti obuhvaćen slučajnim nepredviđenim događajima (kvarovima i sl.) što je njihov ukupni broj veći.

Putem dalekovoda za prenos električne energije povezuju se među sobom i elektroenergetski sistemi, npr. sistemi dviju različitih zemalja. Iako su te veze obično relativno slabe i ne dovode do stvaranja jednog jedinstvenog elektroenergetskog sistema, ipak omogućuju i ekonomičniju izgradnju i ekonomičniji pogon u cjelini. Ovdje treba posebno istaknuti da se maksimalne potrebe potrošača općenito neće pojaviti istodobno u oba sistema, pa će se sistemi moći u periodima maksimalne potrošnje međusobno pomagati. Time se dakako smanjuje potrebna ukupna instalirana snaga u oba sistema.

Vrste električnih prenosnih mreža. Prema upotrijebljenoj struji, električne mreže mogu se podijeliti na istosmjerne i izmjenične, a potomje na jednofazne i trofazne mreže. *Istosmjerne mreže* upotrebljavaju istosmjerni napon i istosmjernu struju. Nakon općeg uvođenja trofaznog sistema, istosmjerni sistem prenosa bio je potpuno napušten. U posljednje vrijeme on se opet pojavljuje, zasada u sasvim malom broju pojedinačnih slučajeva gdje njegove prednosti dolaze do izražaja. Danas se smatra da istosmjerni prenos ima prednosti u ovim slučajevima: pri prenosu na veoma velike udaljenosti (pri istosmjernom prenosu nema problema stabilnosti); pri dužem prenosu pomoću kabela, naročito ispod mora (nema problema zbog nabojnih kapacitivnih struja, a i problem izolacije znatno je ublažen), i pri povezivanju velikih

trofaznih mreža (nema problema održavanja sinhronizma i sekundarnih problema s tim u vezi). *Jednofazne mreže* upotrebljavaju jednofazni izmjenični napon i struju sinusoidnog oblika; one se primjenjuju samo iznimno za prenos električne energije, npr. na električnim željeznicama (v. *Elektrifikacija željeznica*). *Trofazne mreže* upotrebljavaju trofazni izmjenični napon i struju; one se, zbog prednosti trofaznog sistema pred jednofaznim i istosmjernim, gotovo isključivo upotrebljavaju za prenos električne energije. Zbog toga će u ovom članku biti govora isključivo o trofaznim električnim mrežama.

Sistemi prenosa električne energije mogu se razlikovati i po tome koja se osnovna električna veličina (napon ili struja) drži konstantnom, a koja se mijenja prema potrebama pogona. Potrošački centar preuzima kroz određeno vrijeme potrebnu količinu električne energije, koja se dobiva množenjem snage s vremenom. No snaga nije konstantna, nego se od jednog trenutka do drugog mijenja u skladu s potrebama potrošača. Prilagođenje potrebnoj snazi može se postići promjenom struje i napona, ili (što je jednostavnije) samo promjenom struje ili samo promjenom napona. Tako su se razvila dva sistema, i to ne samo za prenos električne energije, nego općenito i za proizvodnju, distribuciju i potrošnju: *sistem konstantnog napona* i *sistem konstantne struje*. Danas elektro-energetika u svijetu primjenjuje gotovo isključivo sistem konstantnog napona, u kojemu se napon drži što je moguće čvršće na određenoj konstantnoj vrijednosti, a promjeni opterećenja se mreža prilagođuje promjenom veličine struje.

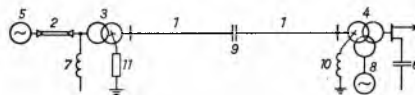
Za veće prenose potreban je i viši napon, pa postoje mreže različitih naponskih nivoa. Karakterističan je za svaku mrežu njezin *nazivni napon*, o kojemu ovise različita svojstva mreže (prvenstveno električna čvrstoća izolacije), a među ostalim i najveći dozvoljeni pogonski napon (koji se u normalnom pogonu ne smije prekoračiti). Tablica 1 daje nazivne napone i njima pripadne najveće dozvoljene pogonske napone, kako ih propisuje naš standard (IUS N. A2.001/1957).

Tablica 1

NAZIVNI I NAJVEĆI POGONSKI NAPONI

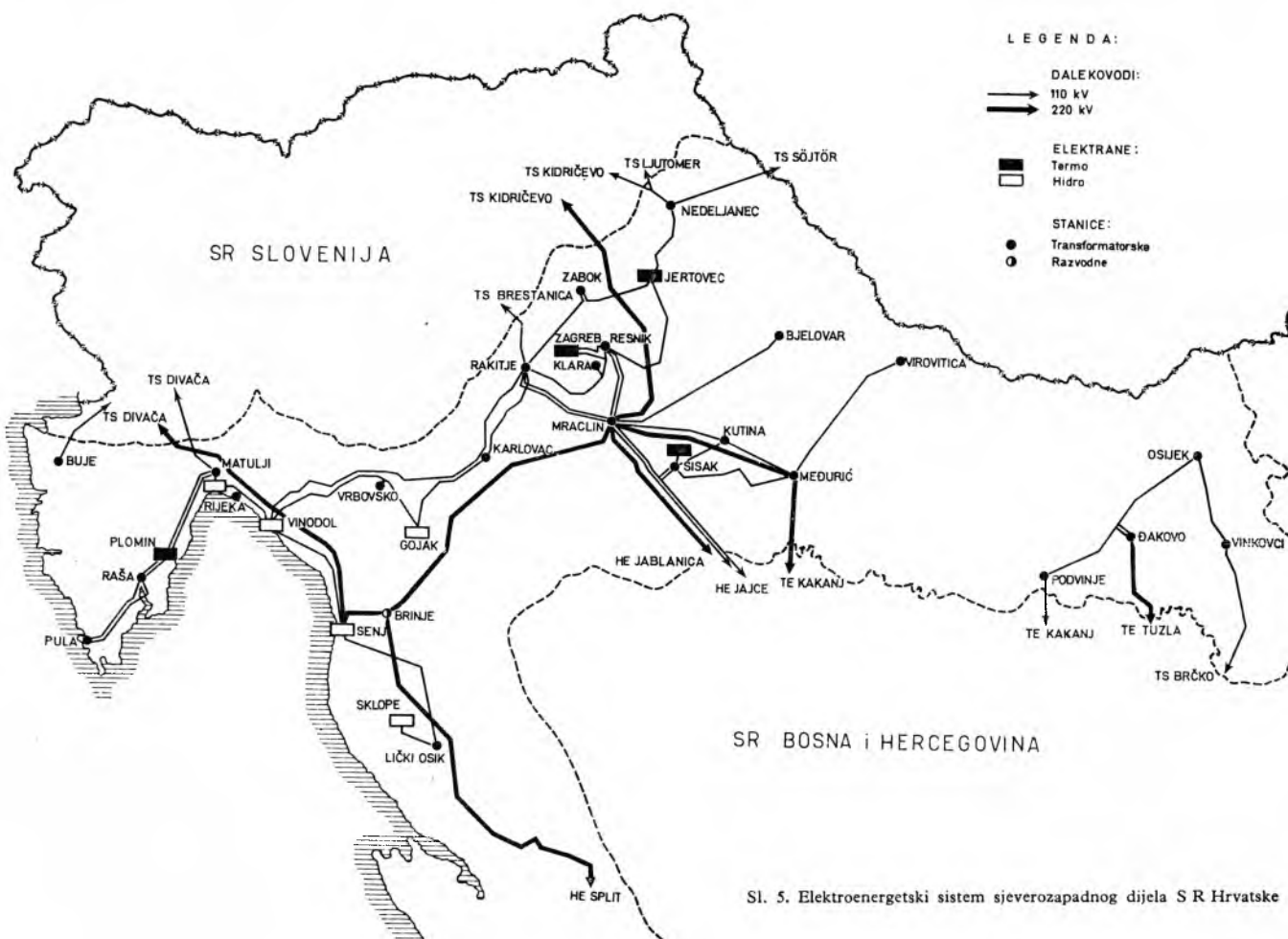
Nazivni napon, kV	3	6	10	20	35	60	110	220	380
Najveći pogonski napon, kV	3,6	7,2	12	24	38	72,5	123	245	420

Elementi mreže. Električne mreže sastoje se od vodova koji povezuju električna postrojenja. U postrojenjima nalaze se različiti dijelovi postrojenja koji se zajedno s vodovima zovu elementi mreže. Na sl. 6 simbolički su prikazani glavni elementi mreže koji svojim električnim svojstvima utječu na električne prilike u mreži. Oni će ovdje biti ukratko opisani, a više o njima može se naći u odgovarajućim člancima u ovoj enciklopediji.



Sl. 6. Simbolički prikaz glavnih elemenata mreže.
1 Dalekovod (nadzemni vod), 2 kabel, 3 uzlazni transformator (dvonamotni), 4 silazni transformator (tridonamotni), 5 generator, 6 statički kondenzator, 7 poprečna prigušnica, 8 sinhroni kompenzator, 9 serijski kondenzator, 10 dozemna prigušnica, 11 dozemni otpornik

Vodovi služe za transport električne energije od jednog mjesta na drugo, a mogu biti izvedeni kao dalekovodi (nadzemni vodovi) ili kabeli (obično podzemni, v. članke *Dalekovodi* i *Električni vodovi*). Budući da je za prenos električne energije potreban razmjerno visoki napon, potrebni su u mreži transformatori koji transformiraju energiju s jednog napona na drugi (v. *Transformatori*). Oni služe kao uzlazni (za povišenje napona) ili kao silazni (za sniženje napona), a mogu biti izvedeni kao dvonamotni, kao tro-



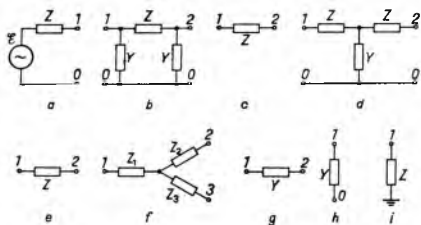
namotni ili kao auto-transformatori (u štednom spoju). Kao elemente mreže treba obuhvatiti i generatore (v. *Električni strojevi*), koji služe za proizvodnju električne energije. Sve su to bitni elementi mreže bez kojih ne može postojati nijedna mreža za prenos većih količina energije na veće udaljenosti.

Za poboljšanje električnih prilika u mreži često se upotrebljavaju različiti dodatni elementi. Na fazne vodiče u poprečnom spoju priključuju se bilo statički kondenzatori, bilo prigušnice, bilo sinhroni kompenzatori, da bi se utjecalo na veličinu jalove snage koja se prenosi. *Statički kondenzatori* uzimaju iz mreže kapacitivnu jalovu snagu, čime se poboljšavaju naponske prilike pri većim opterećenjima. *Prigušnice* uzimaju iz mreže induktivnu jalovu snagu, čime se poboljšavaju naponske prilike pri vrlo malim opterećenjima, a time se ujedno poboljšava stabilnost mreže. *Sinhroni kompenzatori* mogu, već prema tome kakva im je uzbuda, djelovati kao kondenzatori ili kao prigušnice, te imaju i posebne prednosti zbog vlastite elektromotorne sile, ali se zbog svoje konstrukcije ne mogu direktno priključiti na napone iznad nekih 20...30 kV.

Na fazne vodiče u serijskom spoju priključuju se *serijski kondenzatori* da bi se smanjio uzdužni induktivitet vodova, čime se poboljšavaju naponske prilike i stabilnost mreže. Konačno se za poboljšanje električnih prilika još priključuju neki elementi mreže između zvjezdista transformatora i zemlje. Zvjezdiste se u mrežama za prenos najčešće uzemljuje direktno, ali se između zvjezdista i zemlje mogu umetnuti *dozemne prigušnice* ili *otpornici* koji smanjuju struju pri jednopolnim kvarovima.

U mreži postoje još neki elementi koji u manjoj mjeri ili indirektno utječu na električne prilike. Utjecaj *mjernih transformatora* je tako malen da se redovito zanemaruje. To mogu biti naponski transformatori spojeni između faznih vodiča i zemlje, u kojima je struja zanemarljivo malena, ili strujni transformatori spojeni u seriju, u kojima je pad napona zanemarljivo malen. *Sklopke* i *rastavljači* utječu na konfiguraciju mreže, jer je ova različita prema tome jesu li oni uklopljeni ili isključeni, i tako indirektno utječu na električne prilike u stacionarnom pogonu. Sklopke prilikom uklapanja i isklapanja imaju i direktni utjecaj na električne prilike, ali samo za vrijeme prelaznih pojava između dva stacionarna stanja. Slični utjecaj unutar prelaznih pojava imaju i *odvodnici prenapona* i *iskrišta*, koji se priključuju između faznih vodiča i zemlje radi zaštite pojedinih elemenata mreže od prenapona (v. *Električni sklopni aparati*).

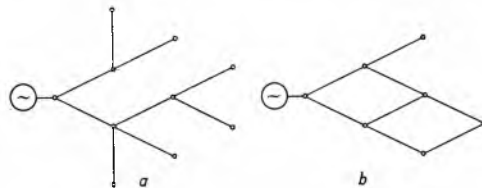
Za određivanje električnih prilika u stacionarnim stanjima pojedini se elementi prikazuju pomoću *ekvivalentnih shema*, koje se povezuju u ekvivalentnu shemu mreže. Na sl. 7 prikazane su ekvivalentne sheme glavnih elemenata mreže. Generator i sinhroni kompenzator prikazuju se impedancijom Z spojenom u seriju s izvorom konstantnog napona. Svi ostali elementi mreže prikazuju se samo pomoću impedancija Z odnosno admitancija Y ($= 1/Z$), jer su to pasivni elementi bez elektromotorne sile. Vo-



Sl. 7. Ekvivalentne sheme glavnih elemenata mreže. a) Generator ili sinhroni kompenzator, b) c) vod, d) e) transformator, f) tronamotni transformator, g) uzdužni kondenzator (serijski), h) poprečni kondenzator, i) prigušnica ili otpornik

dovi se prikazuju pomoću Π -sheme, ili, pojednostavnjeno, samo jednom uzdužnom impedancijom. Transformatori se obično prikazuju pomoću T-sheme, ili opet samo jednom uzdužnom impedancijom. Tronamotni transformatori prikazuju se pomoću tri impedancije spojene u zvijezdu. Kondenzatori se prikazuju pomoću jedne admitancije, a prigušnice, odnosno otpornici, pomoću impedancije. Kod admitancija koje prikazuju kapacitet kondenzatora često se zanemaruje djelatna komponenta, a slično je kod impedancija koje prikazuju induktivitet prigušnica.

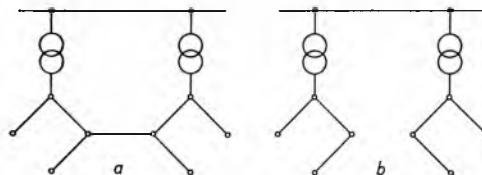
Oblik ili konfiguracija mreže ovisi o tome na koji su način električna postrojenja ili pojedini dijelovi unutar pojedinih postrojenja jedni s drugima spojeni. Osnovni oblik mreže može biti ili zrakast ili zamkast (sl. 8 a i b); takva podjela mreža po obliku prvenstveno se odnosi na manje mreže s jednim izvorom. U *zrakastim mrežama* nema zatvorenih zamki (petlja) i potrošači se uvijek napajaju s jedne strane, pa kad zbog kvara ispadne neki vod, potrošači ostaju bez snabdijevanja električnom energijom.



Sl. 8. Primjeri oblika mreže. a) Zrakasta mreža, b) zamkasta mreža

U takvoj mreži tokovi su snaga ovisni samo o potrošačima i lako ih je odrediti. U *zamkastoj mreži* pojedina su postrojenja među sobom višestruko povezana, uslijed čega nastaju u mreži zamke. Potrošači na taj način imaju mogućnost da se s više strana napajaju, pa ne ostaju odsječeni od izvora kad ispadne neki vod. Tokovi snaga ovisne ne samo o potrošačima nego i o električnim svojstvima same mreže, a računski ih je znatno teže odrediti. I pri nastanku kratkog spoja prilike u zamkastoj mreži nepovoljnije su nego u zrakastoj.

U većim mrežama, koje imaju veći broj izvora, već samim tim potrošači se mogu napajati s više strana, pa se zrakasta mreža ponaša u tome pogledu kao zamkasta. To bi došlo do izražaja i u



Sl. 9. Primjer mreže s dva naponska nivoa. a) Paralelni pogon, b) sekcionirani pogon

obliku mreže kad bismo zamislili da se sva postrojenja u kojima se nalaze izvori napajaju iz jednog te istog izvora na koji su priključena preko pojnih vodova. Još je složenija situacija kad izvori imaju više naponskih nivoa, pa transformatori imaju ulogu izvora električne energije za mrežu određenog napona (sl. 9). U tom slučaju mogu nastati zamke koje obuhvaćaju dijelove mreža s različitim naponom, pa se to naziva *paralelni pogon* mreža različitog napona (sl. 9 a). Ako mreža jednog napona (obično nižeg) ima takav oblik da se svaki njen dio napaja samo iz jedne transformatorske stanice, to se naziva *sekcionirani pogon* (sl. 9 b). Pri tome su transformatorske stanice s druge naponske strane (obično sa strane višeg napona) među sobom povezane, da bi se dobio jedinstveni elektroenergetski sistem. Prednosti i nedostaci sekcioniranog i paralelnog pogona analogne su prednostima i nedostacima zrakastih i zamkastih mreža.

Na oblik mreže utječe i uklopno stanje pojedinih električnih postrojenja, tj. da li su neke sklopke (ili rastavljači) uklopljene ili isključene. Na sl. 10 prikazane su *tipične sheme* spoja za elektranu i transformatorsku stanicu. U elektrani pomoću sklopaka mogu se uklopiti pojedini generatori ili vodovi, a pomoću rastavljača (nisu prikazani na slici) mogu se pojedini generatori priključiti na jedne ili druge sabirnice i rastaviti elektranu na dva električno odvojena dijela. Slično, čak s još više mogućnosti, vrijedi za transformatorsku stanicu.

S oblikom mreže vezano je i pitanje *rezerve*, jer svaki element mreže može zbog kvara ispasti iz pogona. Da se održi snabdijevanje potrošača ne samo kvantitativno nego i kvalitativno, potrebno je u mreži predvidjeti i rezervne elemente mreže, tako da i u slučaju ispada nekog elementa nema većih poteškoća. Rezervni elementi mreže obično se drže u pogonu, iako ne bi bili prijeko potrebni,

jer redovito smanjuju gubitke u mreži i daju veću sigurnost u snabdijevanju potrošača.

Matematičkim odnosima u vezi s njihovim oblikom bavi se *topologija mreža* (v. *Električni krugovi*, str. 50), koja mrežu promatra kao neki broj *čvorova* općenito povezanih *granama*. Neki oblik mreže može se postepeno sagraditi počevši od bilo kojeg čvora (to je onda *zavisni čvor*). Svaki novi čvor poveže se jednom granom na već nastalu mrežu (to su *nezavisni čvorovi*). Tako dobivena mreža nema zamke (petlji) i zove se *stablo*. Očito je ukupni broj čvorova u mreži za 1 veći od broja nezavisnih čvorova n . Broj grana g stabla jednak je broju nezavisnih čvorova, a broj petlji jednak je nuli. Ako se između čvorova koji već postoje dalje dodaju grane (te se grane nazivaju *spojnice* ili *tetive*) ne uvodeći nove čvorove, svakom će se tetivom stvoriti jedna nova nezavisna petlja. Dodavanjem jedne tetive može se dobiti istodobno i veći broj petlji, ali je samo jedna od njih nezavisna. Ukupni broj nezavisnih petlji p jednak je broju tetiva, pa konačno za bilo kakav oblik mreže vrijedi

$$g = n + p,$$

tj. broj grana jednak je sumi nezavisnih čvorova i nezavisnih petlji.

Normalni pogon mreže

Razdioba snagā. Električna mreža povezuje veći broj izvora električne energije s potrošačima ili potrošačkim centrima. Svaki pojedini potrošač ili potrošački centar u svakom trenutku zahtijeva određenu snagu; suma tih snaga predstavlja opterećenje mreže. Izvori električne energije u mreži moraju zajednički pokrivati to opterećenje i u svakom trenutku davati potrebnu snagu u mrežu. Osim snage koju zahtijevaju potrošači, izvori moraju dakako nadoknaditi i gubitke snage koji nastaju u mreži prilikom prenosa.

Razdioba ukupne snage na pojedine izvore vrši se u prvom redu s obzirom na same izvore (hidroelektrane s dovoljno vode u toj sezoni, ekonomičnije termoelektrane, elektrane van remonta), ali uvijek mora postojati dovoljna snaga u izvorima mreže, i to ne samo za pokrivanje zahtjeva potrošača nego i za rezervu u slučaju kvara, a isto tako i za potrebnu elastičnost u razdiobi snage.

U kvalitet dobavljenje električne energije uključuje se ispravan režim frekvencije, ispravan režim napona i pouzdanost dobave. Za ispravnim režim frekvencije odgovorni su prvenstveno izvori, a za ostalo mreža. Pod ispravnim režimom napona razumijeva se da napon ne odstupa previše od nazivne vrijednosti (obično do 10%). Do odstupanja napona od nazivne vrijednosti dolazi zbog pada napona u pojedinim dijelovima mreže u ovisnosti o snazi koja se prenosi. Za pouzdanost dobave važno je da pojedini dijelovi mreže imaju dovoljnu prenosnu moć ne samo kad su svi elementi mreže ispravni i u pogonu, nego i kad ispadnu pojedini elementi uslijed kvara.

Snaga koju mreža prenosi proporcionalna je iznosu napona i iznosu struje. Zbog toga se za mreže koje prenose veće snage izabire viši nazivni napon, a promjena snage postiže se promjenom iznosa struje. I napon i struja izazivaju naprezanja u mreži, koja

pojedini dijelovi mreže moraju biti kadri da izdrže s dovoljnom sigurnošću.

Naponsko naprezanje u mreži. Zbog napona dolazi do naprezanja izolacije pojedinih elemenata mreže i u normalnom pogonu to naprezanje trajno postoji. Naprezanje je to veće što je viši pogonski napon dotičnog elementa, ali je visina pogonskog napona ograničena propisima i ne smije prekoračiti iznos maksimalno dozvoljenog pogonskog napona. Svi dijelovi izolacije nekog elementa mreže nisu napregnuti istim naponom. Većinom je izolacija napregnuta naponom koji vlada između faznih vodiča i zemlje (fazni napon), ali neki dijelovi izolacije mogu biti napregnuti naponom koji vlada između jednog i drugog faznog vodiča (linijski napon). S druge strane, napon koji napreže izolaciju može biti i manji, npr. na izolaciji između zvjezdista transformatora i zemlje.

Iako izolacija može kratkotrajno biti električki napregnuta znatno više nego u normalnom pogonu (uslijed tzv. prenapona), ipak o naponskom naprezanju u normalnom pogonu treba voditi računa jer je to naprezanje dugotrajno. Prema trajnim naponskim naprezanjima naročito je osjetljiva kruta izolacija, u kojoj se zbog dielektričnih gubitaka stvara toplina. U određenim uvjetima izolacija se sve više zagrijava, što zajedno s naponskim naprezanjem dovodi do tzv. toplinskog proboja izolacije.

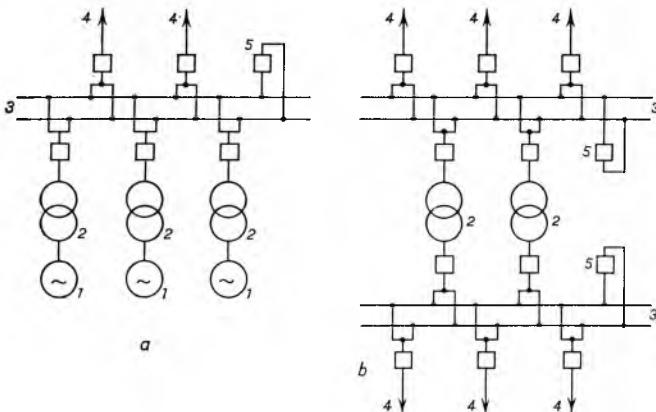
Strujno naprezanje u mreži. U pojedinim elementima mreže kroz koje teče struja nastaju gubici koji su proporcionalni kvadratu struje i djelatnom otporu tog elementa. Ne samo što se time gubi dio proizvedene snage (a tokom vremena i dio proizvedene energije), nego uslijed toga dolazi do zagrijavanja koje može postati štetno ako prekorači dozvoljenu granicu. Pojedini elementi mreže moraju biti dimenzionirani tako da struja ne prekorači njihovu termičku granicu. Kod nekih elemenata mreže (transformatora, kabela) već je struja normalnog pogona mjero-davna za njihovo dimenzioniranje s obzirom na zagrijavanje, iako kratkotrajno mogu izdržati i nešto veće struje.

Presjek vodiča nadzemnih vodova dimenzionira se obilnije nego što bi to zahtijevala struja normalnog pogona u zdravoj mreži (kad nema ispada pojedinih elemenata iz pogona zbog kvara), jer je to ekonomičnije. Traži se, naime, rješenje pri kojem su ukupni troškovi prenosa (troškovi investicije i troškovi gubitaka) najmanji. U nadzemnim vodovima je situacija takva da je ekonomični presjek znatno veći od onoga kojemu je termička granica jednaka pogonskoj struji. Ipak se u normalnom pogonu i kod nadzemnih vodova ide sa strujom do termičke granice, ali samo u havariranoj mreži (kad su zbog kvara neki elementi mreže — prvenstveno vodovi — ispalili iz pogona), jer je tada važnije dobiti energiju potrošačima nego posući najekonomičniji prenos u pojedinim dijelovima mreže.

Režim napona u mreži. Pogon mreže treba voditi tako da napon bude manje-više konstantan, tj. da se tokom vremena ne mijenja mnogo i da ne odstupa znatno od vrijednosti nazivnog napona. Razlog je tome što su elementi mreže i trošila građeni tako da najpovoljnije rade kad je napon jednak nazivnome. Općenito se može uzeti da je dozvoljeno odstupanje $\sim \pm 10\%$, a u posebnim slučajevima i manje.

Naponi na početku i na kraju svakog elementa mreže razlikuju se zbog pada napona u uzdužnoj impedanciji tog elementa, pri čemu je pad napona jednak umnošku impedancije i struje koja kroz nju teče. Razlika napona to je veća što je veći pad napona, a budući da su posrijedi izmjenični naponi i struje, naponi se na početku i na kraju elementa među sobom razlikuju i po iznosu i po kutu. Za režim napona važna je samo razlika po iznosu, koja se često naziva gubitkom napona. U mrežama za prenos električne energije glavni dio impedancije pojedinih elemenata mreže čini reaktancija (jalovi otpor), pa gubitak napona ovisi uglavnom o jalovoj komponenti struje, jer pad napona uslijed jalove struje u reaktanciji ima isti fazni kut kao i sam napon. Budući da se struja u mreži neprestano mijenja, kako to već odgovara trenutnim potrebama potrošača, mijenjaju se i padovi napona, pa i sam napon u pojedinim tačkama mreže.

Poboljšanje režima napona može se postići time da se smanje padovi napona. To se najdjelotvornije može riješiti tako da se mreža izgradi za viši napon, jer se time smanjuju struje, pa i padovi napona. Osim toga su s obzirom na viši napon mreže padovi



Sl. 10. Tipične sheme spoja, a Elektrane, b transformatorske stanice; 1 generatori, 2 transformatori, 3 dvostruke sabirnice, 4 odvojeci vodova, 5 spojna sklopka

napona i relativno manji. Nadalje je povoljno što više smanjiti reaktancije u mreži. To se može postići prikladnom konstrukcijom pojedinih elemenata mreže (npr. auto-transformatorima, dalekovodima sa snopovima vodiča), većim brojem elemenata spojenih paralelno, umetanjem serijskih kondenzatora (koji direktno kompenziraju reaktanciju). Korisno je također smanjiti što više jalovu struju, što se postiže kompenzacijom jalove snage u potrošačkim centrima.

Ipak je potrebno napon i regulirati. Osnovna regulacija vrši se na generatorima u elektranama. Regulacija napona u mreži vrši se u regulacionim transformatorima kojima se može mijenjati broj zavoja za vrijeme pogona. Konačno se regulacija napona može vršiti i promjenom jalove snage kod potrošača.

Tokovi snaga u mreži. Općenito se u mreži nalaze izvori i potrošači bilo kako raspodijeljeni. Snaga se prenosi od izvora do potrošača kroz mrežu, te općenito nije lako sagledati kolike se snage prenose kroz pojedine elemente mreže. Najjednostavniji je slučaj otvorena (zrakasta) mreža s jednim izvorom, jer je u njoj put snage od izvora do pojedinih potrošača tačno određen. U zatvorenim (zamkastim) mrežama s većim brojem izvora, kakve su danas redovito u primjeni, snaga ima mnogo različitih putova između izvora i potrošača. Ipak se za svako pogonsko stanje u mreži uspostavljaju tačno određeni tokovi snage kroz pojedine elemente mreže. Tokovi na koje se posebno ne utječe nazivaju se *prirodni tokovi snage*. Tokovi snage uvjetovani su usklađenjem padova napona u pojedinim elementima mreže, jer u jednom čvoru mreže (u kojem se sastaje veći broj elemenata) može za određeno pogonsko stanje postojati samo jedan napon.

Prirodni tokovi općenito ne predstavljaju najpovoljniji način prenosa snage od izvora do potrošača ni u ekonomskom ni u tehničkom pogledu. Oni, s jedne strane, ne predstavljaju ono stanje u mreži koje daje minimum gubitaka pri izvršenju istog zadatka, a s druge strane može doći do preopterećenja pojedinih elemenata mreže iznad termičke granice. Zbog toga je korisno, a gdje kada i potrebno, umjetno utjecati na tokove snaga, tj. vršiti regulaciju tokova snaga u mreži.

Na tokove snaga može se utjecati promjenom reaktancije pojedinih elemenata mreže, npr. umetanjem serijskih kondenzatora (time se smanjuje reaktancija i povećava snaga u tom elementu). Tokovi snaga mogu se regulirati i pomoću regulacionih transformatora koji se nalaze unutar jedne zamke u mreži. Reguliranje napona djeluje, naime, jednako kao dodavanje dodatnog napona, uslijed kojega unutar zamke teče dodatna struja ovisna o tom naponu i impedanciji zamke. Zbog dodatne struje promijene se prvotni tokovi snaga. Kako se impedancija zamke sastoji pretežno od reaktancija, to će dodatna struja zaostajati za dodatnim naponom skoro za punih 90°. Ako se, dakle, u transformatorima upotrijebi uzdužna regulacija napona (regulacija po iznosu), promijenit će se uglavnom tokovi jalove snage. Ako se pak upotrijebi poprečna regulacija napona (regulacija po kutu), što je također moguće transformatorima koji su u tu svrhu posebno izgrađeni, promijenit će se uglavnom tokovi djelatne snage.

Kompenzacija jalove snage u mreži. Općenito se može smatrati nepovoljnim kad se prenosi jalova snaga, jer to nepotrebno opterećuje elemente mreže, povećava gubitke, a povećava i padove napona. Kako potrošači, osim djelatne snage, traže i jalovu snagu, prenos se jalove snage može izbjeći tako da se ona proizvodi kod potrošača ili u potrošačkim centrima (što je razmjerno lako, jer za to ne treba energetski izvor). Na taj se način kompenzira jalova snaga potrošača, pa za prenos ostaje uglavnom djelatna snaga.

Jalova snaga koju traže potrošači praktički je uvijek induktivna (zbog magnetskog kruga trošila), pa se kompenzacija sastoji u proizvodnji induktivne jalove snage ili u potrošnji kapacitivne jalove snage (što je u biti jedno te isto.) Za proizvodnju induktivne jalove snage mogu se upotrijebiti već postojeće elektrane koje se nalaze u potrošačkim centrima i koje su zbog zastarjelosti svojih generatora postale neekonomične, pa zbog toga više nisu ni potpuno opterećene. Ponekad se isključivo samo radi kompenzacije postavljaju posebni sinhroni strojevi, tzv. sinhroni kompenzatori (v. *Električni strojevi*) ili statičke kondenzatorske baterije.

U mreži postoje vodovi velike dužine koji imaju znatni po-
prečni kapacitet, pa se također pojavljuju kao potrošači jalove

snage, ali kapacitivne, a ne induktivne. Jasno je da se kapacitivna snaga vodova i induktivna snaga potrošača jedna drugom kompenziraju, ali u određenim pogonskim prilikama može preostati znatna potrošnja kapacitivne jalove snage, koju treba posebno kompenzirati. To se opet može postići bilo proizvodnjom u generatorima ili sinhronim kompenzatorima, bilo potrošnjom induktivne jalove snage u posebno postavljenim prigušnicama.

Ako se želi povećati propusna moć nekog elementa mreže ili se žele smanjiti gubici, povoljno je jalovu snagu što više smanjiti. Međutim, za potrebe regulacije napona u mreži često treba prenositi određenu jalovu snagu, i to bilo kapacitivnu za povišenje napona (kod velikih opterećenja), bilo induktivnu za smanjenje napona (kod malih opterećenja). Regulacija napona zahtijeva, dakle, više od kompenzacije jalove snage u običnom smislu te riječi. Ona zahtijeva u stvari proizvodnju (odnosno potrošnju) takve i tolike dodatne jalove snage da za prenos preostane upravo onolika i onakva jalova snaga da izazove pad napona upravo potreban za povoljni režim napona.

Smetnje u pogonu mreže

Do većih smetnja u pogonu (ispadanja pojedinih dijelova mreže, raspadanja cijele mreže) može doći iz različitih uzroka, kao što su: ispad pojedinog generatora iz pogona, preveliko opterećenje kod potrošača, isklapanja pojedinih dijelova mreže i stvaranje nepovoljne konfiguracije. Međutim, ponekad se javljaju i kvarovi koji nemaju težih posljedica, tako da se pogon može uz manje smetnje i dalje nastaviti bez prekida. Štetne posljedice takvih kvarova mogu biti *nenormalan napon*, *prevelika struja* ili *nenormalna frekvencija*.

Napon ne smije previše odstupati od nazivne vrijednosti, te ne smije biti ni previsok ni prenizak. Do *preniskog napona* može doći zbog prevelikog pada napona u pojedinim preopterećenim elementima mreže, npr. zbog prevelikog opterećenja kod potrošača ili zbog ispada pojedinih dijelova mreže iz pogona. Prenizak napon uzrokuje nepovoljan rad trošila i povećane gubitke u mreži, jer se za prenos iste snage mora struja pojačati.

Do *povišenja napona* iznad propisima dopuštenog maksimalnog pogonskog napona može doći pri ispadanju potrošača. Kao primjer može se uzeti neopterećen dalekovod u kojem zbog njegovog vlastitog kapaciteta teku kapacitivne struje izazivajući u reaktanciji dalekovoda takav pad napona da dolazi do znatnog povišenja napona (na kraju dalekovoda dugog 1000 km napon bi u takvom slučaju bio dva puta viši nego na početku). Pri tome može u generatorima opterećenim velikim kapacitivnim strujama dalekovoda doći do samouzbude, pa ori daju napon makar im i potpuno ukinuli vlastitu uzbudu, što može još više otežati situaciju u mreži. Do povišenja napona dolazi i prilikom zemljospoja (vidi kasnije).

Do *prevelike struje* može doći zbog prevelikog opterećenja kod potrošača ili zbog preopterećenja pojedinih elemenata mreže kad neki dijelovi mreže ispadnu iz pogona. Isto tako može biti izazvano nepovoljnim prirodnim tokovima snaga u mreži.

Do *nenormalne frekvencije* dolazi kad postoji nesklad između ukupne snage proizvedene u elektranama i ukupnog opterećenja kod potrošača (ovdje treba ubrojiti i gubitke u mreži). Odstupanja od normalne frekvencije redovno se usklađuju pomoću automatske regulacije frekvencije tako da određene elektrane brzo reagiraju na svaku promjenu snage u mreži. Ali ako elektrane nisu kadre preuzeti ukupno opterećenje mreže, ipak dolazi do trajnijeg smanjenja frekvencije, što nepovoljno utječe na rad trošila.

Izbjegavanje smetnja. Sve smetnje u pogonu dovode do nepovoljnih posljedica, npr. previsok napon previše napreže izolaciju, prevelike struje mogu dovesti do termičkih oštećenja i sl. Zbog toga treba pogon voditi tako da do smetnja dolazi što rjeđe, da su im štetne posljedice što manje i da se iz pogona što prije eliminiraju.

Prenaponi u električnim mrežama

Osim pogonskog napona u normalnom pogonu i povišenja napona uslijed smetnja, u električnim mrežama može doći do prenapona, koji doduše traju veoma kratko vrijeme, ali zato po iznosu mogu biti veoma visoki, uslijed čega dolazi do znatnih

naponskih naprezanja izolacije. Prenaponi se dijele na unutarnje i vanjske. *Unutarnji prenaponi* su oni kojima je uzrok, pa i izvor energije za stvaranje tih prenapona, unutar iste mreže u kojoj se ti prenaponi stvaraju. Zbog toga visina unutarnjih prenapona ovisi o pogonskom naponu mreže, te se za različite slučajeve može izraziti odgovarajućim višekratnikom pogonskog napona. Unutarnji prenaponi mogu nastati zbog nagle promjene stanja mreže uslijed pogonskih sklapanja, kvarova i isklapanja kvarova, a rjeđe i zbog ferorezonancije. *Vanjski prenaponi* su oni kojima je uzrok, pa i izvor energije za stvaranje tih prenapona, izvan mreže u kojoj se ti prenaponi stvaraju. Zbog toga visina vanjskih prenapona nema nikakve veze s pogonskim naponom mreže. Vanjski prenaponi mogu nastati zbog utjecaja druge mreže višeg napona ili zbog atmosferskih utjecaja. Pri stvaranju prenapona pojavljuju se putni valovi (v. *Dalekovodi*, TE 3, str. 159) koji prenose nastale prenapone i u ostale dijelove mreže, pa uslijed toga može doći do kvara u mreži i daleko od mjesta gdje je prenapon nastao.

Klasifikacija prenapona prema uzročniku. Prema uzrocima koji izazivaju prenapone, ovi se mogu podijeliti u prenapone uslijed sklapanja, prenapone uslijed ferorezonancije, prenapone uslijed utjecaja druge mreže i atmosferske prenapone.

Prenaponi uslijed sklapanja. Pri svakoj promjeni stanja u mreži dolazi do kratkotrajne prelazne pojave između prvog i drugog stacionarnog stanja. Mreža se sastoji od strujnih krugova s induktivitetima i kapacitetima, pa dolazi do oscilatornih električnih pojava s naponima više frekvencije i više amplitude nego što ih ima pogonski napon. Do promjene stanja u mreži dolazi pri pogonskim manipulacijama pomoću sklopaka, pa je u pogledu stvaranja unutarnjih prenapona tipično uklapanje ili isklapanje neopterećenih vodova ili transformatora. Unutarnji prenaponi nastaju i prilikom kvarova u mreži, jer nastajanje kratkog spoja ili zemljospoja predstavlja nenamjerno uklapanje na tom mjestu mreže, gašenje struje zemljospoja ili prekid vodiča predstavlja isklapanje, a intermitirani zemljospoj predstavlja neprekidno uklapanje i isklapanje na mjestu kvara. Konačno i relejna zaštita u mreži dovodi do automatskog isklapanja kratkog spoja pomoću sklopki i do automatskog ponovnog uklapanja, pa i to uzrokuje prenapone. Unutarnji prenaponi uslijed sklapanja dosižu u mrežama s kruto uzemljenim zvjezdištem trostruku vrijednost faznog napona, u mrežama sa zvjezdištem uzemljenim preko petersenke (svitka za gašenje luka pri zemljospoju) četverostruku vrijednost faznog napona, a kad bi zvjezdište bilo neuzemljeno, dosizali bi i više vrijednosti.

Prenaponi uslijed ferorezonancije mogu nastati u strujnom krugu s kapacitetom (dalekovodi, kabeli, kondenzatori) i s elementom mreže koji ima jako magnetsko zasićenje (transformatori, prigušnice). Pri tome nastaje skokovita promjena struja i stvaranje prenapona; ti prenaponi redovito ne prekoračuju iznose koji su navedeni za unutarnje prenapone uslijed sklapanja.

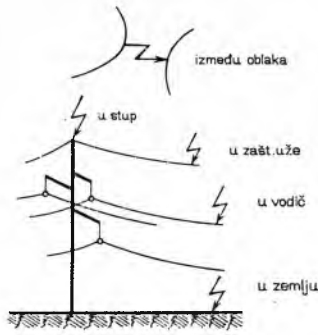
Prenaponi uslijed utjecaja druge mreže mogu nastati u prvom redu zbog galvanske veze između vodiča dviju mreža različitog napona, i to pri slučajnom dodiru, ili pri proboju izolacije, ili električnom preskoku kroz uzduh. Pri tome mreža nižeg napona može dakako doći pod znatno viši napon s teškim štetnim posljedicama, pa i nesrećama, i zbog toga se poduzimaju sve raspoložive mjere da do toga uopće ni ne dode. Do utjecaja druge mreže može doći i kapacitivnim i induktivnim putem, ali to općenito nije opasno.

Atmosferski prenaponi najopasniji su za električne mreže a nastaju zbog udara munje u dalekovode i podstanice. Podstanice je razmjerno lako zaštititi od atmosferskih prenapona uslijed udara munje u njih, ali zaštititi dalekovode teško je jer imaju veoma veliku dužinu a moraju prolaziti i kroz područja s velikim brojem grmljavinskih dana (v. *Elektricitet, statički*, TE 3, str. 588). Nadalje je kod munje važna amplituda i oblik struje (sl. 11). Obično se računa s amplitudom od nekih 50 kA, iako je najčešće znatno manja (ali iznimno može dosegnuti i preko 100 kA). Amplitudu struja dosegne vrlo brzo, kroz nekoliko mikrosekunda, a onda se veličina struje znatno sporije

manjuje. Sličan oblik ima i prenapon koji uslijed toga nastaje; taj se oblik naziva *udarni napon*.

Udarci munje koji su opasni za dalekovod prikazani su na sl.

12. Najopasniji je direktni udar munje u vodič jer može izazvati prenapone od nekoliko miliona volta, što izolacija voda ne može izdržati. Kad munja udari u uzemljene dijelove dalekovoda (stup, zaštitno uže) struja munje odlazi u zemlju, pa se zbog toga pada napona u otporu uzemljenja povisuje električni potencijal čitavog stupa i može doći do povratnog preskoka između stupa i vodiča. I indirektni udar munje u zemlju ili između oblaka izaziva inducirane prenapone u dalekovodu, ali ti u mrežama za prenos nisu opasni, jer su reda veličine 100 kV.



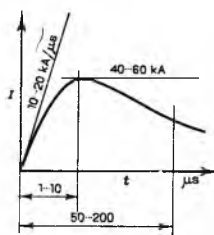
Sl. 12. Udarci munje u dalekovod i okolinu

Mjere protiv prenapona i njihovih posljedica. Sprečavanje stvaranja velikih prenapona prva je mjera zaštite od njihovih štetnih posljedica. U vezi s unutarnjim prenaponima to se može postići dobrom konstrukcijom sklopaka i solidnom izvedbom mreže kojom se smanjuje broj kvarova uzročnika prenapona. U vezi s utjecajem druge mreže to se postiže dovoljnim razmakom između vodiča jedne i druge mreže, te dobro dimenzioniranom i ispravnom izolacijom mreže višeg napona. Od atmosferskih prenapona štite gromobrani iznad podstanica i zaštitna užeta iznad vodiča dalekovoda. Zaštitna užeta preuzimaju direktan udar munje na sebe i tako sprečavaju udar u vodiče. Osim toga, pri udaru munje u stup zaštitna užeta odvođe struju munje u zemlju i kroz ostale stupove, pa je povišenje potencijala stupa manje. Konačno, i inducirani su prenaponi manji ako dalekovod ima zaštitna užeta (v. *Dalekovodi*, TE 3, str. 136 i *Elektricitet, statički*, TE 3, str. 589).

Jedna od najefikasnijih mjera za sprečavanje prenapona jest uzemljenje mreže, što se kod trofaznih mreža provodi uzemljenjem zvjezdišta transformatora. Što je broj uzemljenih transformatora veći i što je impedancija između zvjezdišta mreže i zemlje manja, to će čvršći biti potencijal mreže prema zemlji, pa će prema tome i prenaponi biti manji. Propisi razlikuju efikasno i neefikasno uzemljenje mreže. Efikasno uzemljenje je definirano time da ni pri kakvim nesimetričnim prilikama u mreži (npr. u slučaju kvarova) nigdje neće napon prema zemlji prekoračiti 80% od vrijednosti linijskog napona. Osim što sprečava stvaranje velikih unutarnjih prenapona, uzemljenje mreže korisno je i u vezi prenapona koji nailaze u obliku putnih valova, npr. uzemljenje zvjezdišta transformatora sprečava da se tu naponski val uslijed refleksije podvostruči.

Smanjenje prenapona druga je mjera za izbjegavanje štetnih posljedica, ako već nije pošlo za rukom izbjeći stvaranje prenapona. Prenaponi koji se šire u obliku putnih valova smanjuju se već prirodnim utjecajem mreže. Tako se amplituda postepeno smanjuje zbog djelovanja prigušenja uslijed gubitaka, pri nailasku na račvanje u veći broj vodova amplituda naponskog vala se skokovito smanjuje, a do smanjenja amplitude dolazi i pri prelazu putnog vala iz dalekovoda u kabel. No to sve još ne garantira da će se prenapon smanjiti na iznos bezopasan za izolaciju. Zbog toga se za smanjenje prenapona primjenjuju još odvodnici prenapona i iskrišta (v. *Električni sklopni aparati*).

Iskrište se sastoji od dva roga na određenom razmaku, a postavlja se između vodiča i zemlje. Ako je napon između rogova dovoljno visok, doći će do preskoka između rogova, pri čemu visina probojnog napona uglavnom ovisi o razmaku rogova. Razmak se dimenzionira tako da iskrište izdrži napon koji još nije opasan za izolaciju. Ali ako naide opasni prenapon, iskrište će probiti i stvoriti vezu sa zemljom, pa će na taj način prenapon biti poništen. Iskrište ima i neke nedostatke, od kojih je najneugodniji taj što nakon proboja uslijed prenapona na iskrištu i nadalje ostaje električni luk podržavan pogonskim naponom, što predstavlja kratki spoj, koji treba kao i svaki drugi kratki spoj eliminirati pomoću relejne zaštite.



Sl. 11. Oblik i amplituda struje munje

Odvodnik prenapona djeluje slično kao iskrište, ali bez njegovih nedostataka, jer u seriju s iskrištem ima uključen promjenljiv otpornik, koji zbog svojstava materijala od kojeg je izrađen ima to manji otpor što krozi nj teče veća struja, i obrnuto. Kad naiđe putni val s dovoljno visokim naponom, iskrište na odvodniku probije, i naboj vala (velika struja) lako ode u zemlju. Iza toga se struja smanjuje, pa se otpor u odvodniku poveća i luk se na iskrištu vrlo brzo ugasi. Odvodnici se postavljaju između faznih vodiča i zemlje, a isto tako i između zvjezdišta transformatora i zemlje (ukoliko zvjezdište nije uzemljeno). Odvodnike treba postaviti što bliže objektu koji štite jer je doseg njihove zaštite ograničen.

Ispravno dimenzioniranje izolacije posljednja je mjera koju treba poduzeti da se izbjegnu štete od prenapona, pošto su poduzete ostale mjere za njihovo sprečavanje i smanjivanje. Izolacija se redovito dimenzionira tako da izdrži unutarnje prenapone, pa je nivo izolacije vezan na pogonski napon mreže. Ujedno treba provesti ispravnu koordinaciju izolacije, tako da proboj ili preskok, ako se već ne može izbjeći, nastane tamo gdje je najmanja šteta, prvenstveno na odvodnicima ili iskrištima. Zbog toga zaštitni nivo odvodnika, a to je napon do kojega se uslijed djelovanja odvodnika opasni prenapon smanjuje, mora biti usklađen s nivoom izolacije mreže. U tablici 2 navedeni su izolacioni nivoi za mreže s različitim pogonskim naponom, i to prema Jugoslavenskom standardu JUS N. B0.030/1958. Mreže s neefikasnim uzemljenjem moraju imati puni stupanj izolacije, a mreže s efikasnim uzemljenjem mogu imati smanjeni stupanj izolacije, koji je definiran samo za mreže iznad 100 kV. Izolacioni nivo je definiran efektivnom

Tablica 2
PODNOŠIVI NAPONI IZOLACIJE (JUS)

Maksimalni pogonski napon, kV	Stupanj izolacije		Prenosivi napon, kV	
	smanjeni	puni	izmjenični 50 Hz	udarni 1,2/50
3,6		Si 3,6	16	45
7,2		Si 7,2	22	60
12		Si 12	28	75
24		Si 24	50	125
38		Si 38	70	170
72,5		Si 72,5	140	325
123	Si 123 s		185	450
123		Si 123	230	550
245	Si 245 s		395	900
245		Si 245	460	1050

vrijednošću izmjeničnog napona 50 Hz i udarnim naponom oblika 1,2/50 (v. *Električna mjerenja*, TE 3, str. 629), što izolacija mora biti kadra da izdrži pod određenim uvjetima.

Kvarovi u električnim mrežama

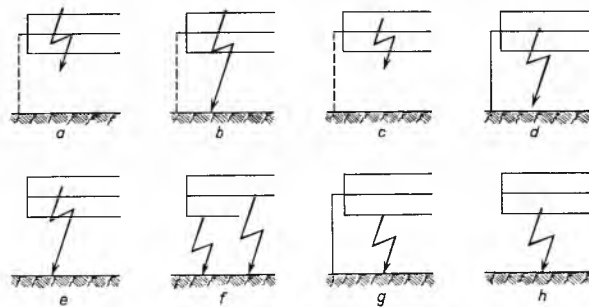
Pod kvarom razumijeva se oštećenje izolacije uslijed proboja ili preskoka koje ima kao posljedicu poremećaj naponskih prilika. Struja teče onuda kuda ne bi smjela, što izaziva teške štetne posljedice. Velike struje kvara stvaraju dinamička i termička naprezanja, naponski poremećaji uzrok su nepravilnog rada trošila (zaustavljanje motora) i gubitka sinhronizma među generatorima, a nesimetrične prilike i struje koje teku u zemlju izazivaju smetnje na dojavnim vodovima i stvaraju opasne potencijalne razlike na površini tla. Zbog toga se kvarovima u električnim mrežama mora pokloniti velika pažnja.

Pojmom kvar mogli bi se obuhvatiti i prekidi vodiča, ali se oni rijetko pojavljuju bez istodobnog oštećenja izolacije i ne dovode do naročitih štetnih posljedica, pa se njima redovito ne posvećuje posebna pažnja.

Uzroci i vrste kvarova. Do kvara može doći ili zbog prevelikog napona (npr. atmosferskog prenapona) ili zbog smanjenja izolacionog nivoa (npr. dodirnom vodiča uslijed njihavanja) ili zbog kombiniranog djelovanja (npr. unutarnjeg prenapona na onečišćenom izolatoru). Uzrok može biti trajan (pad jednog vodiča na drugi, proboj izolacije i sl.) ili prolazan (prenapon, orošenje izolatora koji se uslijed električnog luka osuši i sl.). Kad je uzrok prolazan, na mjestu kvara ostaje električni luk, podržavan pogonskim naponom; on se ugasi tek nakon odvajanja mjesta kvara od izvora,

a nakon ponovnog uklapanja pogon se može nastaviti. Kad je uzrok trajan, treba također odvojiti mjesto kvara od izvora da bi se spriječile dalje štetne posljedice, ali se pogon može nastaviti tek nakon popravka.

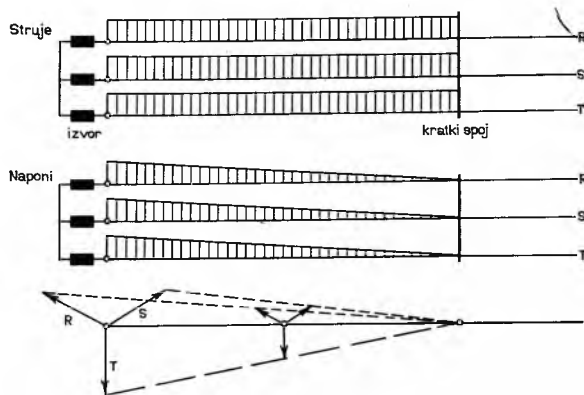
Vrste kvarova prikazane su na sl. 13, gdje je ujedno označeno i uzemljenje zvjezdišta mreže. Zvjezdište može biti uzemljeno (puna crta) ili neuzemljeno, ili je za taj slučaj svejedno da li je zvjezdište uzemljeno ili nije (crtkano). Kvarovi pri kojima se struja zatvara direktno unutar mreže ili preko uzemljenog zvjezdišta nazivaju se *kratki spoj*. Kvarovi pri kojima se struja zatvara kroz zemlju, a zvjezdište nije uzemljeno, nazivaju se *zemljospoj*.



Sl. 13. Vrste kvarova. a i b Tropolni kratki spoj, c dvopolni kratki spoj, d i e dvopolni dozemni kratki spoj, f dvopolni zemljospoj, g jednopolni kratki spoj, h zemljospoj

Prema broju faznih vodiča koji su zahvaćeni kvarom razlikuju se *tropolni*, *dvopolni* i *jednopolni* kvarovi. Kad je kratki spoj tropolan, električne su prilike u mreži simetrične, bez obzira na to da li ujedno postoji ili ne postoji spoj sa zemljom. Pri ostalim kvarovima prilike su nesimetrične, tj. pojedine faze imaju različite struje i napone. Pri dvopolnom dozemnom kratkom spoju postoji kvar između dva vodiča i ujedno spoj sa zemljom. Za razliku od toga, dvopolni je zemljospoj kvar pri kojem dva vodiča imaju spoj sa zemljom ali ne na istom mjestu i bez spoja među sobom (ipak i ovdje teku velike struje slično kao kod kratkih spojeva). Pri zemljospoju (jedenpolnom spoju sa zemljom uz neuzemljeno zvjezdište) nema vidljivo zatvorenog strujnog kruga, ali se krug ipak zatvara preko dozemnih kapaciteta.

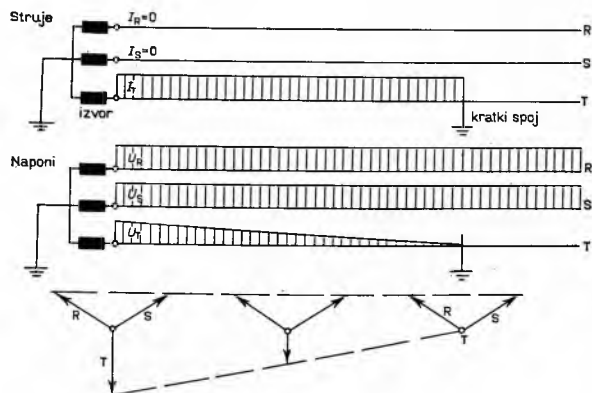
Električne prilike pri kvarovima važne su radi sagledavanja štetnih posljedica i zaštite od njih. Ovdje će biti prikazana samo dva tipična slučaja, i to tropolni i jednopolni kratki spoj. Kad nastane tropolni kratki spoj (sl. 14), kroz sva tri vodiča od izvora do mjesta kvara teku jednake struje (ovdje je dakako mreža pojednostavnjena), a fazni naponi se u sva tri vodiča postepeno smanjuju prema mjestu kvara, gdje im vrijednost pada na nulu.



Sl. 14. Prilike kod tropolnog kratkog spoja

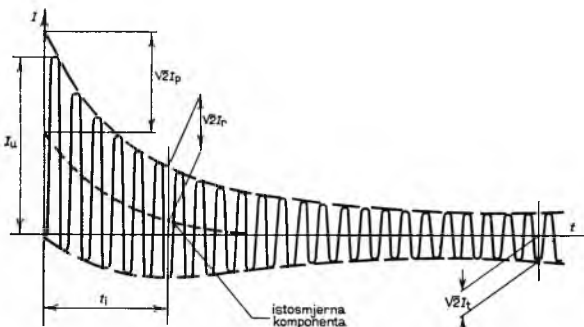
Pri jedenpolnom kratkom spoju (sl. 15) struja teče samo u bolesnoj fazi (pretpostavlja se da je prije nastanka kvara postojalo neopterećeno stanje), a napon postepeno pada na nulu također samo u bolesnoj fazi, dok u zdravim fazama vlada puni napon.

Što se tiče struje, treba imati u vidu da se struja mijenja za vrijeme kratkog spoja, i to zbog promjene magnetskog toka u



Sl. 15. Prilike kod jednopolnog kratkog spoja

generatoru, što je izazvano upravo strujom kratkog spoja. Oscilogram struje prikazan je na sl. 16. Struja ima dvije komponente, izmjeničnu i istosmjernu. Izmjenična komponenta je u početku najveća (početna struja I_p), te se postepeno kroz nekoliko sekundi smanjuje na konačnu vrijednost (trajna struja I_T), a za naprezanje sklopaka važna je i struja u momentu isklapanja (rasklopna struja I_r). Istosmjerna komponenta je također u početku najveća, a kroz vrlo kratko vrijeme postepeno iščezava. Veličina istosmjerne komponente ovisi o momentu nastanka kratkog spoja, te može biti najviše jednaka tjemenoj vrijednosti početne struje. Najveća trenutačna vrijednost struje (udarna struja) važna je za dinamička naprezanja.

Sl. 16. Oscilogram struje kratkog spoja. I_u udarna struja (trenutačna vrijednost), I_p početna struja, I_r rasklopna struja, I_T trajna struja

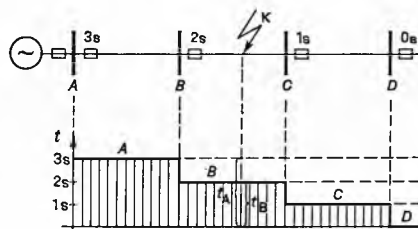
Zaštita od kratkog spoja. U prvom redu mogu se sami kratki spojevi ograničiti po čistoći (ispravnom izolaciji, zaštitom od prenapona), a njihove štetne posljedice po prostoru, tj. na manji dio mreže (prikladnom konfiguracijom mreže), i po intenzitetu (prikladnim shemama spoja, umetanjem prigušnica). Sve to treba provesti prilikom projektiranja mreže. Nadalje treba štetne posljedice ograničiti po vremenu (brzim i pouzdanim isklapanjem, tj. odvajanjem mjesta kvara od izvora), kako ne bi došlo do termičkih oštećenja uslijed dugog trajanja velikih struja kratkog spoja. To se provodi pomoću relejne zaštite, koja obuhvaća sklopke (za isklapanje), mjerne strujne i naponske transformatore (kako bi se omogućilo mjerenje struja i napona) i releje (koji mjere struje i napone, i pošto utvrde postojanje kvara, automatski daju sklop-kama nalog za isklapanje). V. *Rasklopna i transformatorska postrojenja i Električni sklopni aparati.*

Uslijed isklapanja pojedini dijelovi mreže (a možda i potrošači) ostanu izvan pogona, pa i te neželjene posljedice treba ograničiti. Ograničenje je moguće po čistoći (isklapanje samo u slučaju kvara), po prostoru (isklapanje samo najnužnijih dijelova mreže), po vremenu (automatsko ponovno uklapanje, što u slučaju prolaznog uzroka omogućuje nesmetani nastavak pogona) i, konačno, po broju faza (isklapanje samo bolesne faze u slučaju jednopolnog kvara, ali vezano s automatskim ponovnim uklapanjem). Sve to provodi se također pomoću ispravno projektirane relejne zaštite.

Iz rečenoga slijede osnovni zahtjevi koji se postavljaju relejnoj zaštiti: *osjetljivost* (djelovanje samo u slučaju kvara, ali

i uvijek u slučaju kvara), *brzina* (djelovanje što brže), *selektivnost* (isklapanje samo najnužnijeg dijela) i *rezerva* (djelovanje na drugom mjestu, ako na jednom mjestu zaštita zataji). Posebni zahtjevi mogu se postaviti u pogledu automatskog ponovnog uklapanja ili jednopolnog isklapanja. Postoje različite izvedbe releja pa i različite vrste relejne zaštite, a glavne su: nadstrujna zaštita, distantna zaštita i usporedna zaštita. One na različit način ispunjavaju postavljene osnovne zahtjeve. Za ispunjenje zahtjeva selektivnosti važan je dakako i smještaj zaštite u mreži.

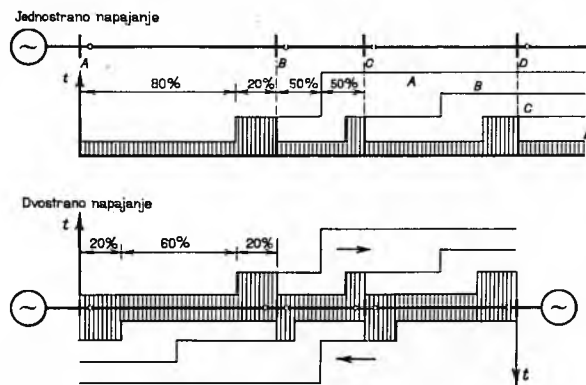
Nadstrujna zaštita. Relej mjeri struju pa prekoračenje određene vrijednosti uzima kao kriterij za postojanje kvara, zbog čega zahtjev osjetljivosti ne ispunjava u potpunosti. Selektivnost se postiže tako da relej ima namjerno umetnuto vremensko zatezanje koje je to duže što se relej nalazi bliže izvoru. Dijagram djelovanja prikazan je na sl. 17, gdje se vidi da će u slučaju prikazanog kvara djelovati relej B nakon $t_B = 2$ sekunde. Relej A neće djelovati, jer bi to učinio tek nakon $t_A = 3$ sekunde (dotle je element u kvaru već iskllopljen), a releji C i D neće kvar ni



Sl. 17. Dijagram djelovanja nadstrujne zaštite

osjetiti. No nažalost selektivnost se na taj način može postići samo za jednostavne mreže (otvorene ili najviše s jednom petljom), pa je ispunjenje zahtjeva selektivnosti ograničeno. Zbog uvođenja vremenskog zatezanja i zahtjev brzine je slabo ispunjen. Jedino je zahtjev rezerve ispunjen u potpunosti, jer ako zataji zaštita na jednom mjestu, djelovat će iduća, koja je bliža izvoru. Zbog svega toga nadstrujna se zaštita u mrežama za prenos električne energije upotrebljava uglavnom kao rezervna zaštita, s tim više što je jednostavna i jeftina.

Distantna zaštita. Ovdje relej mjeri ne samo struju nego i napon, a može biti izveden na različite načine. Za utvrđivanje da li postoji kvar uzima se kao kriterij ne samo prevelika struja nego ujedno i premali napon, pri čemu relej u stvari određuje omjer napona i struje (podimpedantni poticaj). Tako se dobiva potpuna osjetljivost u svakom slučaju. Za postizanje selektivnosti i ovdje je uvedeno vremensko zatezanje, ali to nije konstantno nego je to manje što je relej bliže kvaru. U tu svrhu relej



Sl. 18. Dijagram djelovanja distantne zaštite

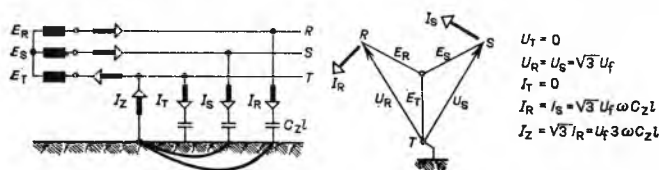
iz izmjerenog napona i struje određuje udaljenost do mjesta kvara (odatle toj zaštiti ime), npr. tako da iz omjera napona i struje određuje impedanciju, koja je manje-više proporcionalna udaljenosti. Time se postiže da uvijek djeluju samo oni releji koji se nalaze najbliže kvaru. Uz to se dodaje još utvrđivanje smjera energije i dozvoljava djelovanje samo onim relejima koji

se nalaze u izlaznim odvojcima podstanica. Tako se konačno postiže potpuna selektivnost za bilo kakvu konfiguraciju mreže.

Dijagram djelovanja distantne zaštite prikazan je na sl. 18, i to za jednostrano i dvostrano napajanje voda s nekoliko odsječaka. Pri tome je upotrijebljena stepenasta ovisnost vremena zatezanja o udaljenosti kvara, kakvu karakteristiku imaju suvremeni distantni releji. Većina kvarova bit će isključena u prvom stepenu ($\sim 0,1$ sekunde), ali neki od njih ipak tek u drugom stepenu (~ 1 sekunda), pa je zahtjevu brzine mnogo bolje udovoljeno nego pri nadstrujnoj zaštiti, ali ipak ne u potpunosti. Zahtjevu rezerve i ova zaštita u potpunosti udovoljava. Distantna zaštita dominira u prenosnim mrežama srednjoevropskih zemalja.

Usporedbena zaštita uspoređuje neku veličinu na početku i na kraju svakog odsjeka. To može biti npr. iznos struje, ili kut struje, ili čak samo smjer energije. Ako unutar odsjeka nema kvara, usporedbena je veličina na početku i na kraju odsjeka približno jednaka, a ako postoji kvar unutar odsjeka, usporedbena se veličina na početku bitno razlikuje od iste veličine na kraju. To je kriterij za utvrđivanje kvara, pa se tako postiže potpuna osjetljivost, ali se ujedno postiže i potpuna selektivnost, jer zaštita ni ne osjeća kvar izvan štićenog odsjeka. Pri tome je i zahtjevu brzine potpuno udovoljeno jer nije potrebno uvoditi nikakvo vremensko zatezanje. Jedino zahtjev rezerve ova zaštita uopće ne zadovoljava, pa je potrebno postaviti posebnu rezervnu zaštitu. Usporedbena zaštita zahtijeva i vezu između početka i kraja odsjeka, koja može biti izvedena fizičkim vodom ili češće kao visokofrekventna veza.

Zemljospoj je kvar tipičan za neuzemljenu mrežu i predstavlja spoj jedne faze sa zemljom. (Dvopolni zemljospoj ovdje se neće razmatrati jer on ima karakter kratkog spoja.) Kad nastane zemljospoj, bolesna faza dolazi na potencijal zemlje, a zdravim fazama se napon povisuje na vrijednost linijskog napona (sl.



Sl. 19 Prilike kod zemljospoja

19). Na mjestu kvara teče truja zemljospoja kroz krug koji stvaraju dozemni kapaciteti zdravih faza. Struja kvara je znatno manja nego kod kratkog spoja, ali ipak može imati štetne posljedice, naročito na mjestu kvara. Poremećaj napona nastaje u čitavoj galvanski povezanoj mreži, pa je izolacija zdravih faza više napregnuta, te mogu lakše nastati dalja oštećenja. U struji zemljospoja sudjeluju dozemni kapaciteti svih galvanski povezanih vodova. Kod manjih mreža struja zemljospoja može biti bezopasna, te se pogon može neko vrijeme nastaviti i sa zemljospojem, ili se, kad je uzrok prolazan, električni luk sam od sebe ugasi, pa time i zemljospoj prestane.

Kao prvo sredstvo zaštite od zemljospoja može se upotrijebiti galvansko odvajanje (obično pomoću dvonamotnih transformatora koji već postoje u mreži), čime se smanjuje, struja kvara i ograničuje područje poremećaja napona. Kao posebno sredstvo zaštite upotrebljavaju se petersenke, tj. prigušnice priključene između zvjezdista transformatora i zemlje, dimenzionirane tako da svojom induktivnom strujom kompenziraju struju dozemnih kapaciteta. Tako na mjestu kvara teče samo mala struja, pa se električni luk ne može održati. Zvjezdiste mreža najvišeg napona, 220 kV i više, uvijek se direktno uzemljuju (da se smanje naponska naprezanja izolacije), pa se time jednopolni kvar pretvara u kratki spoj i eliminira pomoću relejne zaštite.

Stabilnost prenosa u električnim mrežama

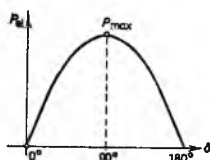
U trofaznoj mreži pogon se može vršiti samo s jednom određenom frekvencijom u čitavoj mreži; ta se frekvencija mora strogo održavati i svi sinhroni strojevi (generatori i eventualni sinhroni motori) moraju se okretati potpuno sinhrono. Održavanje sinhronizma olakšano je time što između strojeva postoji

sinhronizaciona sila kojom jedan stroj vuče drugi u sinhronizam. U određenim uvjetima sinhronizam može biti ugrožen, ali će pogon ipak ostati stabilan sve dok se sinhronizam uspije održati. Pogon je nestabilan ako se sinhronizam ne može održati. U tom slučaju dolazi do velikih struja izjednačenja, izbacivanja sklopaka i općenito do raspada elektroenergetskog sistema.

Proučavanje stabilnosti u mreži prilično je složen problem; njegovom se rješenju pristupa promatrajući jedan prenosni sistem između dvije tačke (kombinaciju vodova, transformatora i sl.). Pri najjednostavnijem promatranju svodi se prenosni sistem na samu jednu uzdužnu reaktanciju, a sve ostalo se zanemaruje. Tada se električna snaga prenosa može prikazati izrazom

$$P_{e1} = \frac{E_1 \cdot E_2}{X} \sin \delta, \quad (1)$$

gdje je E_1 napon na početku prenosnog sistema, E_2 napon na kraju prenosnog sistema, X reaktancija sistema, δ kut između napona na početku i kraju.



Sl. 20. Krivulja snaga-kut

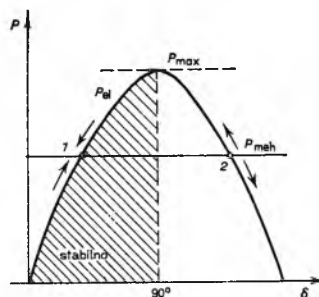
Ako se ni naponi ni reaktancije ne mijenjaju u okviru danog promatranja, postoji sinusoidna ovisnost snage od kuta δ (sl. 20). Tada se maksimalna snaga dobiva ako kut δ iznosi 90° .

Do uvjeta u pogonu koji ugrožavaju stabilnost može doći jedino putem promjena pogonskog stanja. Radi jednostavnosti, problematika stabilnosti promatra se samo sa dva ekstremna stanovišta.

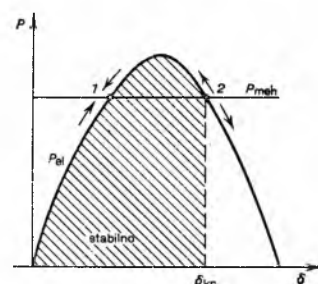
Prvo je **statička stabilnost**, tj. stabilnost u stacionarnom pogonskom stanju u kojem praktički nema nikakvih promjena, a do kojeg je stanja pogon došao nizom veoma sporih promjena. Drugo je **dinamička stabilnost**, tj. stabilnost u prelaznom stanju, koje nastaje nakon veoma nagle promjene stanja u mreži.

Statička stabilnost. U pojednostavnjenom prenosnom sistemu, koji ima na početku sinhroni generator a na kraju sinhroni motor, vrijedi za električnu snagu izraz (1), pri čemu kao napone treba uzeti elektromotorne sile strojeva (iza njihove sinhronne reaktancije); u ukupnu reaktanciju sistema treba uračunati i sinhronne reaktancije strojeva, a kao kut treba uzeti kut između elektromotornih sila strojeva (što fizički odgovara kutu između njihovih rotora). Uz električnu snagu može se na crtežu prikazati i mehanička snaga (koja je neovisna o kutu) kao horizontalni pravac (sl. 21). Postoje dvije tačke ravnoteže, ali je samo tačka 1 stabilna, jer sinhronizacione sile (kod najsitnijih poremećaja, koji uvijek postoje) djeluju u smislu nacrtnih strelica. (Sinhronizaciona sila proporcionalna je razlici između mehaničke i električne snage.)

Očito je da će pogon biti stabilan dok se pogonska tačka (tačka ravnoteže) nalazi na lijevoj (uzlaznoj) strani krivulje. Granicu stabilnosti predstavlja najviša tačka krivulje, čemu u ovom slučaju odgovara kut od 90° . U općem će slučaju krivulja snaga-kut izgledati drugačije, ali će vrijediti isti opći kriterij stabilnosti: da se pogonska tačka mora nalaziti na uzlaznoj strani krivulje. Taj se kriterij može proširiti i na mrežu s većim brojem strojeva, ako se svakom stroju pridaje pripadna krivulja snaga-kut. Pogon će biti stabilan ako se pogonske tačke svih strojeva nalaze na uzlaznom dijelu njihovih krivulja ili, drugim riječima, ako se s povećanjem kuta pojedinog stroja povećava i njegova električna



Sl. 21. Statička stabilnost



Sl. 22. Dinamička stabilnost

snaga. Za određeno pogonsko stanje na taj se način može utvrditi da li je statička stabilnost održana ili nije.

Dinamička stabilnost. Kod naglih promjena stanja nastaje njihanje rotora strojeva zbog zajedničkog djelovanja sinhronizacionih sila i rotorskih masa. Rotori se njišu oko tačke ravnoteže u konačnom stacionarnom stanju, a to je tačka 1 na sl. 22. Nijhanje se može vršiti sve do kritičnog kuta koji odgovara tački 2, jer unutar toga područja sinhronizaciona sila još uvijek vraća rotor prema tački stabilne ravnoteže (tački 1), pa makar bio i prekoračen vrh krivulje. Jedino kad bi njihanje bilo tako jako da se prekorači tačka 2, stabilnost bi bila izgubljena.

Za utvrđivanje dinamičke stabilnosti potrebno je promatrati krivulju njihanja, koja prikazuje ovisnost kuta o vremenu. Čim se kut počinje smanjivati, to je dovoljno za utvrđivanje da će stabilnost biti sačuvana, jer će zbog otpora njihanje iza toga biti sve manje i konačno će se smiriti. Ovaj se kriterij može proširiti i na mrežu s proizvoljnim brojem strojeva time što se za svaki stroj odredi njegova krivulja njihanja. Određivanje krivulja njihanja dugotrajan je posao, jer sinhronizaciona sila za svaki pojedini stroj ovisi o električnim prilikama svih strojeva u mreži i još o utjecaju same mreže. Pri tome obično nastaje nekoliko uzastopnih promjena stanja u mreži, npr. kratki spoj, isklapanje, automatsko ponovno uklanjanje.

Poboljšanje stabilnosti. Prilike statičke stabilnosti mogu se poboljšati tako da se poveća prenosna snaga prema izrazu (1). Očito je da se to može postići povećanjem napona (prelaz na viši nazivni napon, povećanje pogonskog napona mreže, povećanje elektromotorne sile strojeva) i smanjenjem uzdužne reaktancije (upotreba više elemenata mreže u paralelnom spoju, upotreba snopova na dalekovodima, upotreba auto-transformatora, umeštanje serijskih kondenzatora, podjela vodova na odsjke tako da kad nastane kvar ne ispadne čitav potez). Nadalje se upotrebljava i podupiranje napona unutar prenosnog sistema (najčešće pomoću sinhronih strojeva), čime se jedan dugi potez podijeli na više kraćih s manjim reaktancijama.

Dinamička stabilnost može se poboljšati istim sredstvima kao i statička stabilnost, ali je korisno poduzeti osim toga i mjere navedene u nastavku. U prvom redu treba spriječiti ili ublažiti udarce u mreži (nagle promjene kod potrošača i u elektranama). Budući da su za dinamičku stabilnost najneugodniji kratki spojevi, korisno je što više ih ograničiti, kako je to opisano ranije kod kvarova. Isto vrijedi i za štetne posljedice zbog isklapanja elemenata koji su u kvaru. Korisna je i brza regulacija napona generatora koja djeluje za vrijeme njihanja, a također i sredstva za ublaženje njihanja (brza regulacija turbine, prigušni namoti na generatorima i, konačno, veća masa rotora).

Planiranje električnih mreža

Zadaci koje treba da izvrši električna mreža nisu statički, oni se mijenjaju od jednog trenutka do drugog prema potrebama potrošača i mogućnostima izvora. U svakom trenutku mora biti ispunjeno mnoštvo uvjeta kako bi mreža u cjelini potpuno ispunila svoj zadatak. Ti su uvjeti uglavnom ovi: *fizički uvjeti*, tj. mreža mora biti u stanju da prenese potrebne snage (postojanje potrebnih vodova, transformatora i sl., stabilnost pogona), *uvjeti kvaliteta*, tj. prenos kvalitetne energije (režim napona, režim frekvencije), *sigurnost mreže*, tj. naprezanja pojedinih elemenata mreže moraju biti u dopuštenim granicama da ne dođe do oštećenja (naprezanje izolacije, termička granica), *sigurnost ljudi i okoline*, tj. mreža u pogonu ne smije izlagati ljude i okolinu opasnosti (blizina dijelova pod naponom, potencijalne razlike na tlu, utjecaj na telekomunikacione vodove), *pouzdanost dobave*, tj. mora biti osigurano potrebno snabdijevanje potrošača i u slučajju vjerojatnih smetnji i kvarova (potrebna rezerva u vodovima, transformatorima i sl.).

Svi ti uvjeti određuju samo jednostranu granicu, tj. mreža ne smije biti preškrto dimenzionirana, ali preobilno dimenzioniranje mreže ne bi došlo u suprotnost s navedenim uvjetima. Međutim, osim tih uvjeta moraju biti ispunjeni i ekonomski uvjeti, tj. ukupni troškovi mreže u pogonu (amortizacija, gorivo, gubici, eventualne štete) moraju biti po mogućnosti minimalni, pa to postavlja obostranu granicu za dimenzioniranje mreže:

preškrto dimenzionirana mreža bila bi skupa u pogonu, a preobilno dimenzionirana u investiciji.

Pogonske prilike u mreži periodički se manje-više ponavljaju, i to iz dana u dan i iz godine u godinu. Pri tome postoji i određeni stalni porast proizvedene, prenesene i potrošene električne energije, ali i tim porastom vlada određena zakonitost, osim za slučaj krupnih lokalnih promjena u mreži (gradnje novih izvora, dijelova mreže ili trošila). Zbog stalnog povećavanja ukupnih zadataka mreže, mrežu treba neprekidno nadograđivati, tako da mreža bude u stanju pratiti porast proizvodnje i potrošnje energije. Budući da projektiranje i izgradnja pojedinih dijelova mreže traje nekoliko godina, potrebno je sagledati izgled mreže za nekih 5 godina unaprijed, što predstavlja *kratkoročno planiranje mreže*. No izgradnja mreže mora biti u skladu i s daljim razvojem, pa je potrebno (makar grublje) sagledati izgled mreže za nekih 20-30 godina unaprijed, što predstavlja *dugoročno planiranje mreže*.

Planiranje mreže (kratkoročno i dugoročno) vrši se obično u nekoliko odvojenih etapa, a to su: utvrđivanje energetske podloga, izbor konfiguracije mreže i naponskih nivoa, te izbor ostalih tehničkih rješenja.

Energetske podloge obuhvaćaju u prvom redu potrebe potrošača u promatranom vremenskom periodu, i to po lokaciji, po brojčanim pokazateljima (maksimalna snaga, ukupna energija, faktor snage i sl.), po posebnim karakteristikama (npr. noćni potrošači) i, konačno, po trendu razvoja. One, nadalje, na sličan način obuhvaćaju raspoložive izvore, i one koji postoje i one koje je moguće u promatranom periodu izgraditi. Na temelju toga sastavlja se energetska bilansa i utvrđuje kada koji novi izvor mora stupiti u pogon, te na koji će način biti izvršena raspodjela snaga na elektrane u pojedinim karakterističnim pogonskim stanjima. Pri tome treba uvažiti sezonske potrebe potrošača i njihove dnevne maksimume i minimume, te karakteristike izvora, npr. za termoelektrane cijenu goriva, a za hidroelektrane sezonski režim raspoložive količine vode.

Konfiguracija mreže i naponi. Konfiguracija mreže, tj. lokacija podstanica i potezi pojedinih vodova, utvrđuje se na temelju energetske podloge tako da se (gledano u cjelini) snaga što kraćim putem prenosi od izvora prema potrošačima. Naponski nivoi pojedinih dijelova mreže izabiru se s obzirom na snage i udaljenosti prenosa. Sve se to provjerava za različita pogonska stanja, i to ne samo za normalni pogon nego i za slučaj ispada pojedinih elemenata mreže i za slučaj smetnji i kvarova, jer prije postavljeni uvjeti uvijek moraju biti ispunjeni. Redovito se radi s velikim brojem varijanta, od kojih se konačno izabire najpovoljnija.

Ostala tehnička rješenja treba također utvrditi prilikom planiranja mreže, a to su uglavnom: presjek vodiča na dalekovodima, sheme podstanica, izolacioni nivo u mreži, prenaponska zaštita, uzemljenje zvjezdista, nivo rasklopne snage, relejna zaštita, regulacija napona, potrebna rezerva u mreži, itd.

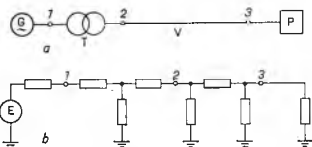
Proračun električnih mreža

Proračun električne mreže ima svrhu da se uz zadane uvjete odrede električne prilike u pojedinim tačkama mreže, tj. da se izračunaju osnovne električne veličine (naponi i struje) i izvedene električne veličine (prvenstveno snage). Za proračun stacionarnih stanja postupci se baziraju na proračunima mreža s istosmjernom strujom, koji uz primjenu simboličkog računa vrijede i za mreže s izmjeničnim strujama. Proračun se vrši za jednu fazu; to pri proračunu trofaznih mreža vrijedi za simetrične prilike, a kad su prilike nesimetrične, primjenjuje se metoda simetričnih komponenata (direktna, inverzna i nulta mreža, koje su opet jednofazne). Isti postupci mogu se primijeniti i za proračun nestacionarnih stanja ako se ona razbiju u niz stacionarnih stanja pa se računaju promjene stanja »korak po korak« (V. *Električni krugovi*).

Osnovni zakoni za proračun električnih mreža jesu: *Ohmov zakon* (za svaku granu mreže napon je jednak umnošku struje i impedancije, odnosno struja je jednaka umnošku napona i admitancije: $U = IZ$, $I = UY$); *prvi Kirchhoffov zakon* (suma struja u svakom čvoru mreže jednaka je nuli, pri čemu ulaznim i izlaznim strujama treba pridati odgovarajući predznak:

$\sum I = 0$); drugi Kirchhoffov zakon (suma napona u svakoj petlji jednaka je nuli, pri čemu treba uračunati i elektromotorne sile i padove napona i svakom naponu s obzirom na smjer pridati odgovarajući predznak: $\sum U = 0$). U izrazima za te zakone U je napon, I struja, Z impedancija, a Y admitancija.

Ekvivalentna shema mreže osnova je za proračun određene mreže, a prikazuje njezinu konfiguraciju (kombinaciju čvorova i

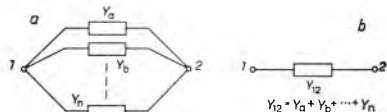


Sl. 23. Ekvivalentna shema mreže.
a) Jednopolni prikaz mreže,
b) ekvivalentna shema

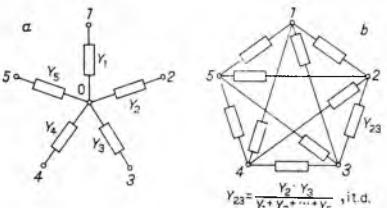
grana) i zadane brojčane veličine. Konfiguracija mreže dobije se spajanjem ekvivalentnih shema pojedinih elemenata mreže. Na sl. 23 a prikazana je jedna jednostavna mreža koja se sastoji od generatora, transformatora, voda i potrošača, a na sl. 23 b njezina ekvivalentna shema.

Električne veličine najčešće se daju kao reducirane veličine, posebice u mrežama s nekoliko naponskih nivoa (povezanih pomoću transformatora), pa onda nije za izračunavanje električnih veličina više potrebno uzimati u obzir prenosni odnos transformacije. Pri tome se može postupiti na tri različita načina. Prema metodi otpora uzima se jedan od napona mreže kao bazni napon, pa se faktor redukcije izračunava iz omjera stvarnog i baznog napona. Naponi se reduciraju proporcionalno faktoru redukcije, struje obrnuto proporcionalno, impedancije proporcionalno kvadratu faktora, a snage nije potrebno reducirati. Na kraju proračuna mreže obrnutim se postupkom dobivaju opet stvarne veličine. Prema metodi »per unit« izabire se jedna određena snaga kao bazna, a kao bazni napon uzima se napon dotičnog dijela mreže, pa se odatle izračunaju bazna struja i bazna impedancija. Reducirane veličine dobiju se dijeljenjem stvarne veličine s pripadnom baznom veličinom. Prema metodi reduciranih admitancija vrijednosti pojedinih grana dobivaju se dijeljenjem kvadrata napona s impedancijom (kod vodova i sl.), odnosno dijeljenjem nazivne snage s relativnim naponom kratkog spoja (kod transformatora i sl.). Snaga ostaje nepromijenjena, a struja dobiva brojčanu vrijednost snage za tu struju uz nazivni napon.

Redukcija mreže vrši se sa svrhom da joj se pojednostavi oblik, tj. da se smanji broj čvorova i broj grana. Reduciranu mrežu lakše je proračunati i lakše joj je odrediti električne prilike. Nakon toga može se mreža opet rekonstruirati i tako se mogu dobiti električne prilike u prvotnom obliku mreže.



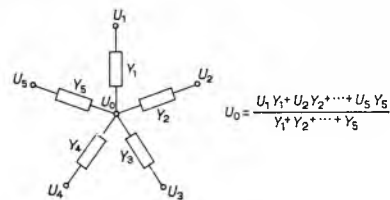
Sl. 24. Redukcija paralelnih grana.
a) Prvotna mreža, b) reducirana mreža



Sl. 25. Transfiguracija zvijezde u poligon. a) Prvotna mreža, b) transfigurirana mreža

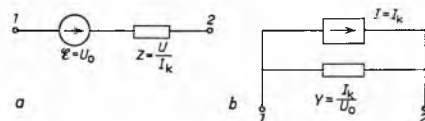
Redukcija pasivne mreže (bez elektromotornih sila) obavlja se postepenim spajanjem paralelnih grana i postepenim eliminiranjem čvorova. Postupak spajanja paralelnih grana prikazan

je na sl. 24; njime se broj grana svaki put smanjuje bar za jednu granu. Postupak eliminacije čvorova prikazan je na sl. 25; on se može provesti bez obzira na to koliko je grana priključeno na čvor koji se eliminira. Dotične grane čine zvijezdu s određenim čvorovima kao vrhovima krakova. Ta se zvijezda transfigurira u opći poligon s istim čvorovima kao vrhovima (nove grane se umeću između svakog para čvorova); svakom takvom transfiguracijom smanjuje se broj čvorova za jedan. Kombinirajući oba postupka može se mreža reducirati na proizvoljni broj čvorova, u krajnjem slučaju na dva čvora i jednu granu između njih. Nakon što se izvrši proračun reducirane mreže (pa su time određeni i naponi čvorova) mreža se rekonstruira istim putem unatrag, s time da se svaki put izračuna napon rekonstruiranog čvora prema postupku prikazanom na sl. 26. Kad se tako izračunaju naponi svih čvorova u prvotnoj mreži, lako je izračunati i ostale veličine.



Sl. 26. Proračun napona rekonstruiranog čvora

Redukcija aktivne mreže (koja sadrži i elektromotorne sile) ne može se provesti na proizvoljni broj čvorova, ali se ona može reducirati na dva čvora. Postupak je taj da se odredi napon praznog hoda U_0 i struja kratkog spoja I_k između ta dva čvora, a reducirana mreža ima oblik i veličine prikazane na sl. 27. Moguća su dva oblika: izvor stalne elektromotorne sile i pasivna grana spojena u seriju (sl. 27 a) i izvor stalne struje i pasivna grana spojene paralelno (sl. 27 b).



Sl. 27. Redukcija aktivne mreže a) s naponskim izvorom i b) sa strujnim izvorom

Redukcija mreže može se upotrijebiti za proračunavanje mreže ako se primijeni i opisani postupak rekonstrukcije, ili samo za pojednostavnjenje mreže radi rješenja zadatka na neki drugi način.

Jednadžbe mreže. Postavljanje jednadžbi koje definiraju pogonsko stanje mreže i njihovo rješavanje predstavlja općenitu metodu za proračun mreže. Uz uobičajenu pretpostavku da grane u mreži imaju konstantnu vrijednost, primjenom osnovnih zakona (Ohmovog i Kirchhoffovih) dobije se sustav linearnih jednadžbi za struje i napone, što se može pisati u matricnom obliku

$$[U] = [Z] \cdot [I], \text{ odnosno } [I] = [Y] \cdot [U], \quad (4)$$

gdje su $[U]$ i $[I]$ jednostupčane matrice napona, odnosno struje, a $[Z]$ i $[Y]$ kvadratne matrice impedancija, odnosno admitancija (v. Električni krugovi).

Već prema tome koji se naponi i struje definiraju u mreži, mogu se jednadžbe mreže pisati na tri različita načina. Prema metodi grana definiraju se naponi i struje pojedinih grana, pa se korištenjem Ohmova zakona za matrice impedancija ili admitancija dobiju dijagonalne matrice, koje imaju smisao matrica impedancija grana ili admitancija grana. To se još mora kombinirati s jednadžbama koje se dobiju primjenom Kirchhoffovih zakona na nezavisne čvorove odnosno nezavisne petlje, pa se konačno dobije toliko linearnih jednadžbi koliko ima grana u mreži. Prema metodi čvorova definiraju se naponi i struje pojedinih čvorova, pa se primjenom prvog Kirchhoffovog zakona uz pomoć Ohmova zakona dobije matricna jednadžba s toliko redaka koliko ima nezavisnih čvorova. Tome odgovara manji broj

linearnih jednadžbi nego pri metodi grana, pa se metoda čvorova najradije upotrebljava, s tim više što se tako dobiju naponi čvorova koji najjasnije određuju električne prilike u mreži. Kvadratne matrice imaju ovdje smisao matrica impedancija čvorova ili admitancija čvorova i redovito su to simetrične matrice. Prema metodi petlja definiraju se naponi i struje pojedinih petlja, pa se korištenjem drugog Kirchhoffovog zakona uz pomoć Ohmova zakona dobije matrica jednadžba s toliko redaka koliko ima nezavisnih petlja. Kvadratne matrice imaju ovdje smisao matrica impedancija petlja, odnosno admitancija petlja.

Prije postavljanja jednadžbi mreže redovito se primjenjuju postupci za redukciju pasivne i aktivne mreže, bilo da bi se dobio oblik mreže koji omogućuje postavljanje jednadžbi bilo da se mreža pojednostavi, kako bi se dobio što manji broj linearnih jednadžbi. Rješavanje jednadžbi mreže ubrzava se pogodnim matematičkim metodama, ali to usprkos tome ostaje veoma dugotrajan posao. Danas se za rješavanje jednadžbi mreže obilno primjenjuju elektronička računala.

Rješavanje pojedinih zadataka. Navedene metode i postupci upotrebljavaju se za rješavanje različitih zadataka u vezi s planiranjem i pogonom mreže.

Za izračunavanje tokova snaga u mreži može se raditi pojednostavnjeno tako da se umjesto snaga računaju struje. Po metodi čvorova postavi se matrica jednadžba s matricom admitancija čvorova, što je relativno lako učiniti. Ta se jednadžba riješi po naponima čvorova, a ostalo je onda lako izračunati. Postoje postupci i za direktno postavljanje matrice jednadžbe s matricom impedancija čvorova. To je znatno duži posao, ali je onda napone lako izračunati. Ako pojednostavnjeni postupak ne zadovoljava nego se žele tačno izračunati snage (koje su definirane strujom i naponom), za to su potrebne jednadžbe koje više nisu linearne. Za rješavanje tih jednadžbi upotrebljava se postupak iteracije, po kojem sukcesivno rješavanje pojedinih jednadžbi postepeno vodi sve bliže k tačnom rješenju.

Pri proračunu kratkog spoja računaju se u stvari struje, pa su jednadžbe linearne. Postupa se slično kao pri izračunavanju tokova snaga, ali su struje svih čvorova jednake nuli osim u bolesnom čvoru. Ta struja nije poznata, ali je poznat napon toga čvora prije kvara. Iz matrice jednadžbe najprije se izračuna struja kvara, a zatim naponi ostalih čvorova i dalje što je potrebno. Kad je kratki spoj nesimetričan, postavljaju se matrice jednadžbe za direktnu, inverznu i nultu mrežu, pa se zadatak rješava uz primjenu formula specifičnih za dotičnu vrstu kratkog spoja.

Pri proračunu stabilnosti postupka se slično kao pri izračunavanju tokova snaga, uz primjenu kriterija specifičnih za proučavanje stabilnosti. Za provjeravanje statičke stabilnosti određuje se prilike u mreži za zadano pogonsko stanje, zatim se zadano stanje neznatno promijeni i električne prilike ponovo izračunaju, pa se provjeri da li je za svaki stroj ispunjen uvjet da mu se s povećanjem kuta povećava i snaga. Za provjeravanje dinamičke stabilnosti računaju se promjene električnih prilika u mreži »korak po korak«, npr. u intervalima od desetinke sekunde. Za svaki korak odrede se prilike u mreži kao za stacionarno stanje, a zatim se iz razlike električne i mehaničke snage svakog stroja izračuna promjena njegovog kuta u idućem intervalu. Odatle se konstruiraju krivulje njihovanja za svaki stroj, pa se provjerava da li je ispunjen uvjet da se svakom stroju kut u nekom momentu počinje smanjivati.

Mrežni analizatori ili modeli mreže omogućavaju eksperimentalno (za razliku od računskog) određivanje električnih prilika u mreži. Čitava se mreža modelira u određenom mjerilu, pa se u modelu mjerenjem određuju električne veličine. O tome vidi potanje u članku *Analizatori, mrežni*, TE 1, str. 292. Mrežnim analizatorima mnogo su se koristili u posljednjih nekoliko dekada, jer su se pomoću njih razmjerno brzo i dovoljno tačno mogli riješiti zadaci čije bi računsko rješavanje trajalo veoma dugo. Danas, kad se sve više prelazi na primjenu elektroničkih računala, mrežni analizatori gube od svog značenja.

Perspektive razvoja mreža za prenos

Može se očekivati da će se električne mreže za prenos energije u budućnosti i dalje razvijati, i to na širokom frontu. U na-

stavku se navodi kakav se razvoj može predviđjeti. Općenita težnja za povećanjem prenosne moći uz sniženje relativnih investicija vodi prema upotrebi sve viših napona i većih presjeka vodiča dalekovoda uz upotrebu snopova i do sve većih jedinica transformatora, strojeva i sl. Istodobni zahtjev za što manjim gubicima traži upotrebu što kvalitetnijih materijala i za magnetske i za strujne krugove uz dodatna sredstva za smanjenje električnog otpora (npr. hlađenje). Bolje iskorištenje energetskih izvora i zahtjev sigurnijeg snabdijevanja potrošača dovodi do izgradnje sve većih elektroenergetskih sistema i do njihovog međusobnog povezivanja. To opet dovodi do sve većih snaga kratkog spoja, pa će se morati konstruirati sklopke sa sve većim rasklopnim snagama, a ujedno tražiti i druga sredstva za ograničenje rasklopne snage u mreži. Veća sigurnost pogona zahtijeva sve kvalitetniju izvedbu svih elemenata mreže, bolju relejnu zaštitu i opću upotrebu automatskog ponovnog uklopavanja. Kod viših napona izolacioni problem dolazi sve jače do izražaja, pa se traži mogućnost relativnog sniženja izolacionog nivoa, dakako uz što bolju prenaponsku zaštitu, npr. uz što širu primjenu odvodnika ne samo za atmosferske nego i za unutarnje prenapone. Nedostaci izmjenične struje u trofaznom sistemu nastoje se sve više izbjeći primjenom istosmjernog prenosa, koji mora riješiti još mnoge probleme, prvenstveno probleme isklapanja. Ipak, već i uz današnje stanje istosmjernog prenosa može se očekivati sve šira njegova upotreba za rješavanje problema stabilnosti, regulacije frekvencije i velikih struja nabijanja kod kabela, pa i za odvajanje jedne mreže od druge radi smanjenja struja kratkog spoja. Težnja za što većim pojednostavnjenjem u gradnji i u pogonu mreža vodi do sve većeg ukidanja pojedinih naponskih nivoa i ostavljanja malog broja različitih napona. I konačno, nastojanje da se električna mreža što bolje izgradi i da se u njoj pogon vodi što bolje zahtijevati će u budućnosti sve veći opseg istraživačkih radova i sve širu primjenu elektroničkih računala.

B. Stefani

MREŽE ZA DISTRIBUCIJU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Mreže za distribuciju (razdiobu, raspodjelu) jesu sistemi nadzemnih i podzemnih (kabelskih) vodova koji služe za raspodjelu električne energije potrošačima. One su opremljene svim za tu svrhu potrebnim sklopnim aparatima i mjernim uređajima, a u njih idu također transformatori za povišenje ili sniženje napona. Transformatori se uvrstavaju na putu raspodjele električne energije u električne mreže na onim mjestima gdje postoji potreba da se napon izmijeni ili gdje se traži regulacija napona.

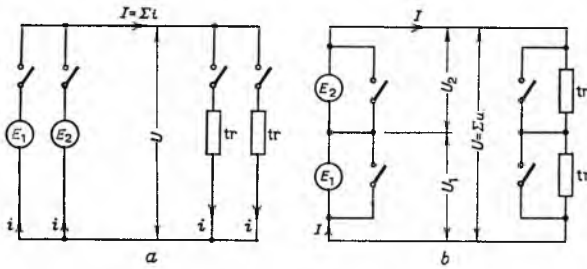
Distributivne mreže zauzimaju važno mjesto u svakom elektroenergetskom sistemu. Uspješnost kojom distributivna mreža obavlja svoju funkciju mjeri se naponskim prilikama, kontinuitetom opskrbe, fleksibilnošću, stupnjem korisnosti i troškovima. Troškovi distribucije predstavljaju važan faktor u troškovima isporuke električne energije: približno 50% investicija u elektroenergetskim sistemima otpada na postrojenja distributivnih mreža.

Zadatak je distribucije da planira i izgrađuje distributivne mreže, da vodi njihov pogon i održava ih, tako da je omogućena pravilna i dovoljna opskrba potrošačkog područja električnom energijom, kako danas tako i u budućnosti, uz najniže moguće troškove. Pri tome treba znati da se određeni tip distributivne mreže ne može ekonomično primijeniti u svim potrošačkim područjima zbog razlika u gustoćama opterećenja, zbog razlika u postojećim distributivnim postrojenjima, u topografiji i u ostalim lokalnim uvjetima.

Pri studiju bilo kojeg potrošačkog područja treba razmatrati kao cjelinu cjelokupni elektroenergetski sistem, od energetskih izvora, preko prenosne i distributivne mreže do instalacija potrošača. Svi dijelovi sistema među sobom usko su povezani kako tehnološki tako i troškovima. Uštede koje se postignu pri gradnji u jednom (izolirano razmatranom) dijelu elektroenergetskog sistema mogu imati za posljedicu povećanje troškova u nekom drugom dijelu sistema.

Tokom vremena, a prema potrebama raspodjele električne energije među potrošače, razvili su se sistemi i oblici distributivnih mreža različiti kako po spoju, vrsti struje i visini napona, tako i po rasporedu i međusobnoj vezi elemenata mreže.

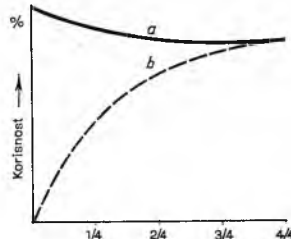
Sistemi spajanja. Izvori energije i trošila mogu se u sistemu za raspodjelu električne energije načelno spojiti ili paralelno ili serijski (sl. 23 a, b).



Sl. 28. Paralelno (a) i serijsko (b) spajanje izvora energije s potrošačima. E_1 i E_2 elektromotorna sila izvora energije, U pogonski napon, tr trošila potrošača

Za *paralelni spoj* karakteristično je da se raspodjela snage, koja se mijenja po iznosu, po mjestu i po vremenu, vrši u cijelom sistemu uz konstantan napon (*sistem konstantnog napona*). U tom se slučaju dopuštaju doduše odstupanja od normiranog pogonskog napona, ali samo unutar granica koje su određene mogućnošću regulacije napona na generatoru ili transformatoru koji napaja trošila potrošača. Aparati za ukupljanje pri tom su sistemu uvršteni u seriju s pojnim vodovima potrošača. Paralelni se spoj danas općenito primjenjuje u javnim i industrijskim distributivnim mrežama. Bitne su mu prednosti mala razlika u korisnosti između praznog hoda i punog opterećenja (sl. 29), fleksibilnost u razvijanju i proširivanju mreže i relativno velika sigurnost u opskrbi električnom energijom.

Za *serijski spoj* karakteristično je da se raspodjela varirajuće snage vrši uz promjenljiv napon i uz skoro konstantnu struju (*sistem konstantne struje*). U tom sistemu, kad varira opterećenje, potrebno je regulirati napon u vrlo širokim granicama. Aparati za ukupljanje spojeni su pri tom sistemu paralelno s potrošačem. Ovaj se spoj danas rijetko primjenjuje osim u specijalnim slučajevima kad se radi o potrošačima velikih i konstantnih struja, npr. pri elektrolizi.



Sl. 29. Korisnost u ovisnosti o opterećenju kod paralelnog (a) i serijskog (b) spoja

Sistem	Schema	Prenosna djelatna snaga
trofazni- trovodni		$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$
trofazni- četverovodni		$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$
jednofazni		$P = UI \cos \varphi$
istosmjerni- dovodni		$P = UI$
istosmjerni- trovodni		$P = UI$

Sl. 30. Sheme i iznosi prenosne djelatne snage P strujnih sistema

Strujni sistemi. Danas se uglavnom primjenjuju samo još tri strujna sistema: trofazni-izmjenični, jednofazni-izmjenični i istosmjerni (sl. 30).

Trofazni sistem izvodi se vodovima sa tri i sa četiri vodiča. U sistemima sa tri vodiča faze trofaznog sistema spojene su u transformatorima u zvijezdu ili trokut (sl. 30 a). Taj se sistem primjenjuje uglavnom u prenosnim i distributivnim mrežama visokog napona (iznad 1 kV). Trofazni sistem s vodovima sa četiri vodiča (sl. 30 b) ima tri faze u spoju na ševuljicu (cik-cak) ili zvijezdu. Njegovo je zvjezdite spojeno na poseban tzv. neutralni vodič (nulvodič). On se uglavnom primjenjuje u distributivnim mrežama niskog napona (do 1 kV, obično 380/220 V) za neposredno napajanje trošila potrošača.

Frekvencija trofaznog sistema u SFRJ iznosi 50 Hz kao i u većini evropskih zemalja. U nekim su zemljama u upotrebi i neke druge frekvencije između 40 i 60 Hz.

Standardni nazivni naponi mreža trofaznog sistema koji vrijede za područje SFRJ (JUS N. A2.001/1957) jesu ovi: za trofazne mreže sa 3 vodiča do 1 kV: 220, 380, 500 i 900 V (za javne mreže standardni je napon samo 900 V); za trofazne-trovodne mreže iznad 1 kV: 3 i 6 kV (samo za industrijska i rudarska postrojenja i kao generatorski napon), zatim 10, 20 i 35 kV; za trofazne mreže sa 4 vodiča: 220/127 V (ne smije se upotrebljavati za javne mreže) i 380/220 V.

Standardni nazivni naponi trofaznih distributivnih mreža nekih zemalja navedeni su u nastavku. Francuska: 1—3,2—5,55 10—15—22—30 kV. Engleska: 3,3—6,6—11—15—22—33 kV. Švedska: 3—6—10—20—30 kV. USA: 2,4—4,16—4,8—7,2—7,6—12,5—14,4—23—27,6—34,5 kV. SSSR: 3—6—10—35 kV.

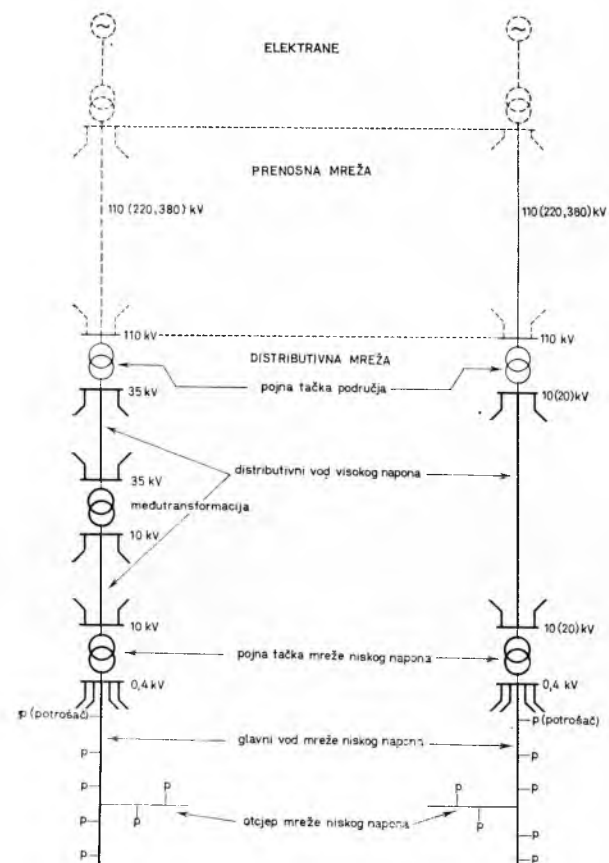
Jednofazni sistem (sl. 30 c) održao se u mrežama visokog napona jedino za napajanje elektrificiranih željezničkih pruga bilo kao samostalni sistem bilo kao sistem napajan preko pretvarača iz mreže trofaznog sistema (v. *Elektrifikacija željeznica*). U mrežama niskog napona primjenjuje se za napajanje postrojenja javne rasvjete u većim mrežama, za napajanje potrošača u manjim mrežama (seoska elektrifikacija) i u potrošačkim instalacijama.

Frekvencija jednofaznog sistema u mrežama visokog napona za napajanje elektrifikacije željezničkih pruga iznosi: 16 $\frac{2}{3}$ Hz, 25 i 50 Hz. U SFRJ se upotrebljava 50 Hz (npr. na magistralnoj pruzi Dobova—Zagreb—Beograd—Skopje). Standardni nazivni naponi mreža jednofaznog sistema na području SFRJ (prema JUS N. A2.001/1957) jesu 127 i 220 V. Za jednofaznu mrežu elektrificiranih željeznica u SFRJ usvojen je napon 25 kV.

Istosmjerni sistem primjenjuje se u prvom redu u dvovodnoj izvedbi (sl. 30 d) i to u mrežama za opskrbu električnom energijom unutar industrijskih pogona, za strujne krugove rasvjete za nuždu, upravljanja i signalizacije, za pomoćne strujne krugove svih vrsta te za napajanje mreža nekih elektrificiranih saobraćajnih sredstava (tramvaja, željeznice). U najnovije je vrijeme *dovodna izvedba* istosmjernog sistema našla primjenu u veleprenosu na velike udaljenosti i s visokim naponima za prenos električne energije između velikih elektroprivrednih sistema i za prenos preko mora i sl. (npr. kabel Gotland—Švedska). *Trovodna izvedba* istosmjernog sistema (sl. 30 e) nalazi se u nekim specijalnim industrijskim postrojenjima i kao ostatak nekadašnjeg sistema elektrifikacije gradova.

Standardni nazivni naponi mreža istosmjernog sistema jesu: 24, 40, 60, 110, 220 i 440 V, a za elektrifikaciju saobraćaja: 600, 750, 1200, 3000 V. Sa 3000 V elektrificirane su u SFRJ željezničke pruge Sežana—Ljubljana—Dobova, Rijeka—Ljubljana i Rijeka—Zagreb (v. *Elektrifikacija željeznica*).

Osnovni elementi distributivnih mreža u njihovoj tipičnoj izvedbi jesu transformatorske stanice i distributivni vodovi visokog i niskog napona (sl. 31). Pojne tačke područja jugoslavenskih distributivnih mreža obično su transformatorske stanice 110/35 kV ili 110/10(20) kV. U nekim zemljama i gradovima Evrope gdje su gustoće opterećenja velike izvode se i transformatorske stanice 220/20 kV kao pojne tačke distributivnih mreža. U pojnim tačkama distributivnih mreža obično su instalirane 2 ili 3 transformatora standardnih veličina: 16, 20, 30 (31,5), 40 i 60 (63) MVA. Iz pojne tačke područja raspodjeljuje se ili distribuira električna energija distributivnim vodovima napona 35,



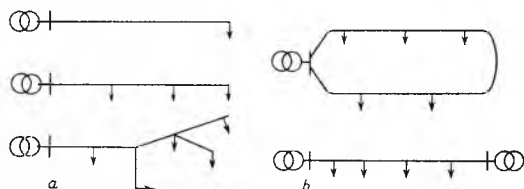
31. Shema elemenata tipičnih distributivnih mreža, sa tri (35, 10 i 0,4 kV) i dva (10 i 0,4 kV) napona

20 ili 10 kV do centara manjih potrošačkih područja. Distributivni vodovi visokog napona izgrađuju se nadzemno (v. *Dalekovodi*) ili podzemno (v. članak *Električni vodovi*). U centrima manjih potrošačkih područja ili se vrši međutransformacija ako je distributivna mreža izvedena sa 3 naponska nivoa (npr. 35, 10 i 0,4 kV) ili se napon izravno transformira na napon potrošačke mreže (380/220 V). Distributivne stanice 35/10 kV snabdjevene su svaka dvama ili trima transformatorima standardnih veličina 2,5, 4, 6,3, 8 ili 16 MVA. Distributivne stanice 10(20)/0,4 kV pojne su tačke mreže niskog napona, tj. potrošačkih mreža. Distributivne stanice 10/0,4 kV opremljene su jednim ili dvama transformatorima standardnih veličina od 30 do 630 kVA, a u industrijskim pogonima i do 1600 kVA. Mreže niskog napona mogu biti izvedene kao nadzemne ili zračne mreže ili kao podzemne, kabeleske mreže. U mrežama niskog napona potrošači se snabdijevaju glavnim vodovima ili otcjepima od glavnih vodova. Spoj potrošačke instalacije s pojnim vodom zove se *potrošački ili kućni priključak*.

Oblici (sistemi) distributivnih mreža

Različiti oblici (sistemi) distributivnih mreža nastali su u različitim okolnostima i prema različitim zahtjevima koji su se postavljali distributivnim mrežama. U tom pogledu razlikuju se distributivne mreže niskog napona od distributivnih mreža visokog napona.

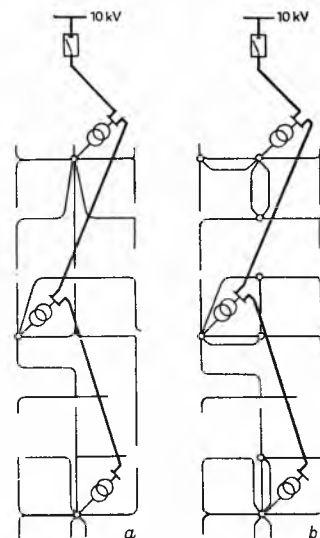
Mreže niskog napona izvode se kombinacijom niskonaponskih vodova (nadzemnih ili kabeleskih). Ovi vodovi služe za ne-



Sl. 32. Oblici pojnih vodova niskog napona jednostruko (a) i dvostruko (b) napajanih

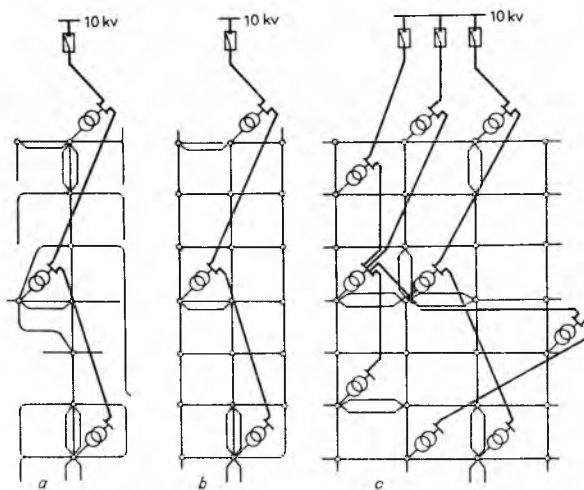
posrednu opskrbu potrošača na relativno kratkim udaljenostima. Potrošači su većinom manje-više ravnomjerno smješteni uz pojne vodove, pa se raspored opterećenja uzduž vodova može tretirati kao kontinuirana raspodjela tereta. Niskonaponski vodovi izvode se ili s jednostrukim napajanjem (sl. 32 a), i to kao jednostavni ili kao razgranati vodovi, ili s dvostrukim napajanjem (sl. 32 b), i to s napajanjem ili iz iste pojne tačke ili iz dviju pojnih tačaka. Presjek vodiča pojnih vodova niskog napona određuje se ili na osnovi dozvoljenog pada napona do najudaljenijeg potrošača u doba maksimalnog opterećenja, ili na osnovi dozvoljenog zagrijavanja materijala vodiča, ili, najzad, na osnovi ekonomskih razmatranja ako su ispunjeni spomenuti tehnički uvjeti. Kombinacijom opisanih vodova nastaju različiti oblici niskonaponskih mreža: zrakasta ili radijalna mreža, prstenasta mreža, poluzamkasta ili djelomično zamkasta mreža i zamkasta mreža jednostruko ili višestruko napajana.

Zrakasta ili radijalna mreža (sl. 33 a) napajana je samo iz jedne pojne tačke. Izjednačenje opterećenja između područja dviju pojnih tačaka nije moguće bez zahvata u mreži niskog napona. Loše strane takvih mreža jesu ograničene mogućnosti proširenja i vrlo mali stupanj sigurnosti opskrbe električnom energijom jer kad nastane kvar na vodovima ili transformatorima, vrlo su slabi izgledi za selektivno otklanjanje njegova uzroka. Iz tih razloga zrakaste se mreže izgrađuju tamo gdje su potrošačka područja prostorno definirana i gdje se ne postavljaju visoki zahtjevi u pogledu kvaliteta napona i sigurnosti u dobavi električne energije.



Sl. 33. Zrakasta (a) i prstenasta (b) mreža niskog napona

Prstenasta mreža (sl. 33 b) ima u odnosu prema zrakastoj mreži bolja svojstva u pogledu mogućnosti izjednačenja opterećenja unutar područja jedne pojne tačke, stupnja sigurnosti u slučaju kvara i u pogledu naponskih prilika. Primjenjuje se kao i zrakasta mreža u prostorno ograničenim područjima.



Sl. 34. Poluzamkasta (a), jednostruko (b) i višestruko (c) napajana zamkasta mreža niskog napona

Poluzamkasta mreža (sl. 34 a) sa djelomično i nepravilno uzamčenim glavnim pojnim vodovima često u praksi nastaje iz zrakastih mreža u nastojanju da se postignu bolje naponske prilike i bolji raspored opterećenja.

Zamkaste mreže karakteristične su po pravilnom i smišljenom uzamčivanju svih pojmih vodova na potrošačkom području. U dimenzioniranju tih vodova uzima se kao osnovno u obzir broj, veličina i raspored svih pojmih tačaka mreže. Izjednačenje opterećenja vrlo je očigledno na području čitave zamke. Ovim je mrežama svojstvena vrlo velika sigurnost u opskrbi električnom energijom. Mogućnosti proširenja vrlo su velike. Zbog toga se uspješno primjenjuju u velikim potrošačkim područjima u kojima su opterećenja potrošača još u razvoju ili u kojima prostorni raspored opterećenja još nije definiran, također u područjima u kojima se postavljaju veliki zahtjevi u pogledu naponskih prilika i sigurnosti dobave električne energije. U jednostruko napajanoj zamkastoj mreži (sl. 34 b), kad nastane kvar na pojnom vodu visokog napona, isklapa se cijelo područje zamke. Ipak u slučaju da ispadne jedan od transformatora u pojnim tačkama, nastavlja se opskrba cijelog područja. Kvar na jednom od pojmih vodova mreže niskog napona ispoljit će se samo na oštećenom vodu i na potrošačima koji su na taj vod priključeni. U višestruko napajanoj zamkastoj mreži (sl. 34 c) ni kvar na pojnom vodu visokog napona ni kvar u bilo kojoj od pojmih tačaka mreže ne uzrokuje poremećaj u opskrbi potrošača. Kvar na pojnom vodu mreže niskog napona ostaje ograničen.

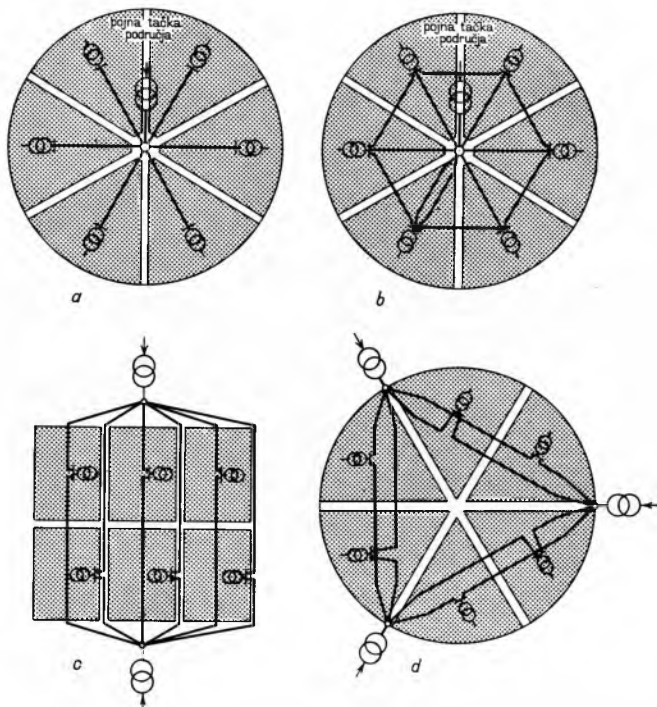
Mreže visokog napona sastoje se od vodova visokog napona (10, 20 ili 35 kV) izvedenih prema potrebi ili mogućnosti kao nadzemni (dalekovodi) ili podzemni (kabelski) vodovi. Distributivni vodovi visokog napona služe bilo za neposredno napajanje velikih potrošača bilo za napajanje pojmih tačaka niskonaponske potrošačke mreže. Kad su distributivne mreže visokog napona izvedene u dva naponska nivoa, npr. sa 35 i 10 kV, distributivni vodovi 35 kV služe za neposredno napajanje vrlo velikih potrošača ili za napajanje transformatorskih stanica 35/10 kV, tj. pojmih tačaka distributivne mreže 10 kV.

Budući da su opterećenja na distributivnim vodovima najčešće koncentrirana na jednom ili više mjesta uzduž voda, mreže visokog napona proračunavaju se kao vodovi s jedne strane napajani a opterećeni na jednom ili više mjesta. Tako se proračunavaju i kad su ti vodovi spojeni u prsten, jer se obično postavlja uvjet da se i u slučaju kvara pogon nastavlja. Presjeci vodiča određuju se ili na osnovi dozvoljenog pada napona između početka i kraja voda, ili na osnovi dozvoljenog zagrijavanja materijala vodiča, ili na osnovi ekonomskih razmatranja.

Kombinacijom vodova visokog napona nastaje niz oblika distributivnih mreža visokog napona: zrakasta ili radijalna, prstenasta i višestruko napajana mreža (sl. 35).

Zrakasta (radijalna) distributivna mreža visokog napona predstavlja danas najrašireniji oblik mreže u jugoslavenskim područjima (sl. 35 a) kao i u svim područjima u početnom stadiju elektrifikacije. Uz niski stupanj pogonske sigurnosti, ovaj oblik mreže nepovoljan je i u pogledu naponskih prilika. **Prstenasta distributivna mreža** obično nastaje iz zrakaste mreže izgradnjom spojnih ili rezervnih vodova u težnji da se poveća pogonska sigurnost (sl. 35 b). U područjima s većom gustoćom potrošnje ili opterećenja (gradskim područjima) oblikuju se **višestruko napajane distributivne mreže** (sl. 35 c i d). Nerijetko se i ove mreže nalaze u radijalnom pogonu, tj. pojne tačke područja ne rade istovremeno i paralelno. Tek u trenucima kvara pojne tačke ili nekog od distributivnih vodova dolazi do izražaja mogućnost rezervnog napajanja.

U osnovi, oblici distributivnih mreža visokog napona u uskoj su vezi s oblicima niskonaponskih mreža jer se uvijek teži za tim da stupanj sigurnosti i ostali kvaliteti jednih i drugih mreža budu podjednaki. To je očigledno na primjeru distributivnih mreža koje napajaju zamkaste mreže niskog napona. Ako je jedna zamkasta mreža ili više njih jednostruko napajano (sl. 36 a), a treba

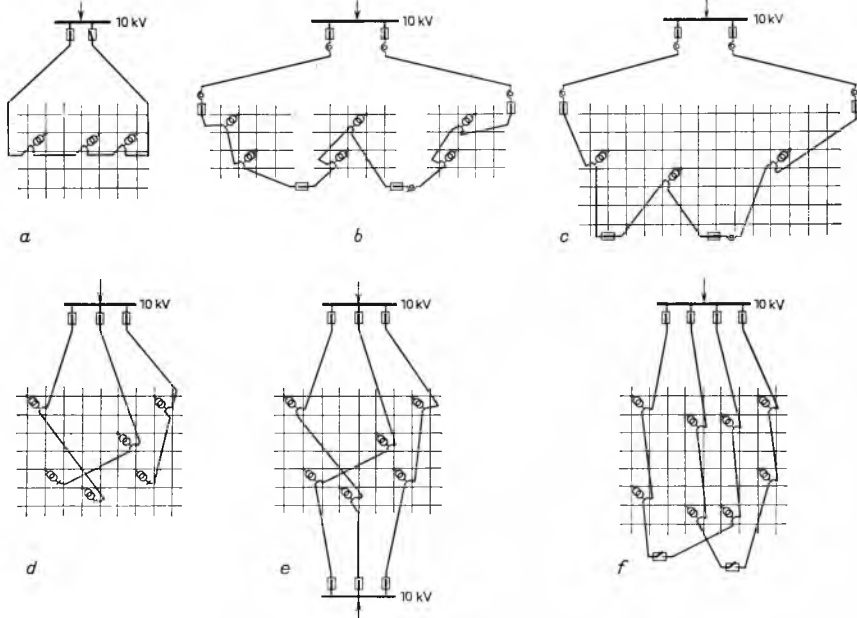


Sl. 35. Karakteristični oblici distributivnih mreža visokog napona. a Zrakasta (radijalna) mreža, b prstenasta mreža, c dvostruko napajana mreža, d trostruko napajana mreža

iz razloga pogonske sigurnosti distributivni vod visokog napona koji napaja pojne tačke zamkaste mreže izvesti u obliku otvorenog prstena, u slučaju je kvara na tom vodu omogućeno napajanje pojmih tačaka i s druge strane. U dvo- i višestruko napajanim zamkastim mrežama niskog napona može se superponirana distributivna mreža višeg napona izvesti u zatvorenom prstenu (sl. 36 b i c), zrakasto (sl. 36 d), s dvostrukim napajanjem vodova visokog napona (sl. 36 e) ili s više otvorenih prstenova (sl. 36 f).

Proračun distributivnih vodova

Presjek vodiča nekog distributivnog voda treba uz zadani napon da zadovoljava ova tri uvjeta: besprijeorno održavanje



Sl. 36. Karakteristični oblici distributivnih mreža visokog napona koje napajaju zamkaste mreže. a Jednostruko napajana zamkasta mreža s vodom 10 kV u otvorenom prstenu, b dvostruko napajane zamkaste mreže s vodom 10 kV u zatvorenom prstenu (uz primjenu diferencijalne zaštite), c dvostruko napajana zamkasta mreža s vodom 10 kV u zatvorenom prstenu (uz primjenu diferencijalne zaštite), d višestruko napajana zamkasta mreža sa zrakastim vodovima 10 kV, e višestruko napajana zamkasta mreža s dvostrukim napajanjem vodovima 10 kV, f višestruko napajana zamkasta mreža s vodovima 10 kV u otvorenim prstenovima

napona unutar propisanih granica u svim slučajevima opterećenja između praznog hoda i punog (vršnog) opterećenja; dopuštena granica ugrijavanja materijala vodiča ne smije biti prekoračena; energija treba da se prenosi uz najmanje troškove.

U niskonaponskim distributivnim mrežama, u kojima po pravilu ne postoji regulacija napona, presjek vodiča izračunava se na osnovi maksimalnog dopuštenog pada napona uz naknadnu provjeru rezultata na ugrijavanje i ekonomičnost. U visokonaponskim distributivnim mrežama, gdje se gdjekad provodi regulacija napona pomoću regulacionih transformatora smještenih u pojnim tačkama ili u centrima opterećenja, presjek vodiča određen je dopuštenim ugrijavanjem i ekonomskim razlozima, uz provjeru nastupajućih razlika napona radi utvrđivanja regulacije.

Uvjeti napona za vodove istosmjernne struje. Proračun presjeka vodiča S vrši se, u slučaju da je napon uvjetovan, prema unaprijed usvojenom (propisanom) padu napona. Taj se može izraziti apsolutnim iznosom $u = U_1 - U_2$ (U_1 napon na početku voda, U_2 napon na kraju voda) ili relativnim iznosom $u_n = u/U_2$ koji se u praksi obično izražava u postocima, $u_r = u/U_2 \cdot 100\%$.

Presjek istosmjernog vodiča na kraju opterećenog voda može se izračunati bilo na osnovi poznate struje I , bilo na osnovi poznate snage P , bilo na osnovi poznatog momenta opterećenja M , koji je jednak umnošku duljine voda l i opterećenja (snage potrošača) P . Taj se moment ($M = P \cdot l$) primjenjuje u elektrotehnici analogno kao zakretni momenti u mehanici (37 a).

Uz poznatu struju presjek vodiča izračunava se pomoću izraza:

$$S = \frac{2 l q I}{u} = \frac{2 l q I}{u_r U}, \quad (5)$$

gdje $2l$ znači duljinu obaju vodiča dvožilnog voda ili duljinu vanjskih vodova pri trožilnom sistemu, q specifični otpor, a U nazivni napon.

Ako je poznato opterećenje $P = UI$, presjek iznosi:

$$S = \frac{2 l q P}{u U} = \frac{2 l q P}{u_r U^2}, \quad (6)$$

a pri poznatom momentu opterećenja:

$$S = \frac{2 q M}{u U} = \frac{2 q M}{u_r U^2}. \quad (7)$$

Za zadani (standardizirani) unaprijed odabrani presjek može se izvršiti provjera da li pad napona leži unutar dozvoljene granice, pomoću izraza:

$$u = \frac{2 q M}{S U} \quad \text{ili} \quad u_r = \frac{2 q M}{S U^2} \cdot 100\%. \quad (8)$$

Uvrsti li se umjesto specifičnog otpora omski otpor vodiča po jedinici duljine $R' = q/S$ u izraz (8), dobije se:

$$u = \frac{2 R' M}{U} \quad \text{ili} \quad u_r = \frac{2 R' M}{U^2} \cdot 100\%. \quad (9)$$

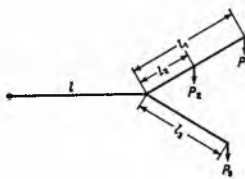
Presjek vodiča višestruko opterećenog voda (s odvojcima na više mjesta) konstantnog presjeka izračunava se tako da se u izraz (6) ili (7) umjesto jednog momenta opterećenja $M = Pl$ uvrsti zbroj svih momenata opterećenja $\sum M$ koji postoje na dotičnom vodu:

$$\sum M = \sum_1^n P_x l_x, \quad (10)$$

gdje znači P_x djelatnu snagu (opterećenje) na mjestu x -tog priključka, a l_x duljinu voda od njegova početka do x -tog priključka (sl. 37 b, $\sum M = P_1 l_1 + P_2 l_2 + P_3 l_3$). Kad je duž voda priključeno više (n) odvoda trošila, uz jednoliko raspoređeno opterećenje, treba računati kao da je cjelokupno opterećenje koncentri-

rano u polovini (u «težištu») dužine voda (sl. 37 c, $\sum M = n P l/2$). Ako postoje na istom višestruko opterećenom vodu odvojci koji su ravnomjerno raspoređeni i jednoliko opterećeni, a osim njih i pojedini neravnomjerno opterećeni odvojci, treba kombinirati

obje metode (npr. na sl. 37 d, $\sum M = \frac{n P l}{2} + P_1 l_1$).



Sl. 38. Razgranati vod niskog napona

Presjek vodiča u razgranatim vodovima (sl. 38) nije u svim dijelovima voda uvijek isti; on je veći u glavnom vodu, a manji u ograncima. Glavni pojni vod proračuna se bilo kao vod opterećen na kraju prema izrazu (8) bilo kao višestruko (na više mjesta) opterećen vod prema izrazu (8) i (10), pri čemu se otcjepi ili ogranci tretiraju kao opterećenja glavnog pojnog voda. Pošto se odredi razlika

napona u_g u glavnom pojnom vodu, izračunaju se razlike napona u_o u ograncima vodeći računa o visini napona na početku ogranka. Tok proračuna objašnjen je na sl. 39 a do d.

Kad se neki glavni pojni vod duljine l_g na nekoj tački grana na više ogranka s duljinama $l_1, l_2, \dots, l_n$, najmanji utrošak materijala za vodiče dobije se ako pad napona u ograncima u_o i pad napona u glavnom pojnom vodu u_g stoje u relaciji

$$\frac{u_o}{u_g} = \sqrt{\frac{\sum P_x' \cdot l_x^2}{1 \cdot P \cdot l_g^2}}, \quad (11)$$

gdje $P_x' = P_x l_x / l_x'$ znači ekvivalentno opterećenje ogranka svedeno na kraj ogranka,

$P = \sum_1^n P_x$ ukupno opterećenje

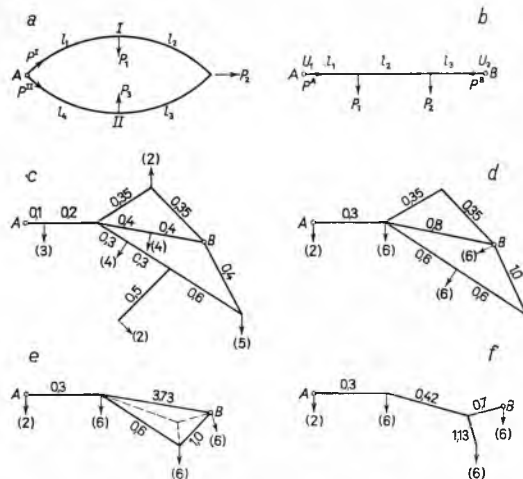
glavnog pojnog voda, l_g duljinu glavnog voda koji se na kraju grana, l_x' duljinu ogranka i l_x duljinu ogranka od njegova početka do mjesta priključka potrošača.

Zatvoreni (prstenasti) jednostruko napajani vodovi konstantnog presjeka računaju se kako slijedi (sl. 40 a).

Svako opterećenje P_x u prstenu treba najprije rastaviti u dvije komponente:

$$P_x^I = P_x \frac{l_x^{II}}{l_p} \quad \text{i} \quad P_x^{II} = P_x \frac{l_x^I}{l_p}, \quad (12)$$

gdje su l_x^I i l_x^{II} duljine grana I i II, tj. duljine vodova između poj-



Sl. 40. Jednostruko napajani prstenasti vod (a), dvostruko napajani višestruko opterećen vod (b), faze proračuna dvostruko napajane mreže (c do f). Brojke bez zagrada znače udaljenosti L_n u km, brojke u zagradama opterećenje P , velika slova pojne tačke

ne tačke i mjesta priključka potrošača x mjerene u smjeru kazaljke na satu, odn. u suprotnom smjeru, l_p ukupna duljina prstena, P_x^I i P_x^{II} dijelovi opterećenja potrošača na mjestu priključka x koji se odnose na granu I, odnosno granu II. (Npr. za opterećenje P_3 na sl. 40 a je $l^I = l_p$, a $l^{II} = l_1 + l_2 + l_3$.) Pojedinačne komponente opterećenja svih potrošača zbrajaju se po granama i na taj se način dobije raspodjela opterećenja u svakoj grani. Tako definirane grane prstena mogu se dalje računati kao višestruko (na više mjesta) opterećeni vodovi napajani s jedne strane [jednadžbe (5) do (10)].

Dvostruko napajani vod (sl. 40 b) može se računati kao jednostruko napajani prstenasti vod ako su naponi na objema pojnim tačkama jednaki. Ako u naponima postoji razlika Δu , treba komponentama opterećenja prstena iz izraza (12) superponirati još snagu izjednačenja:

$$P_{1z} = \frac{\Delta u U^2}{2 R' l}, \quad (13)$$

gdje $\Delta u = \frac{U_A - U_B}{U_A}$ znači relativnu razliku između napona pojmih tačaka, U pogonski napon, R' otpor vodiča po jedinici duljine i l duljina voda. Uzevši u obzir i gore definiranu snagu izjednačenja, dobije se konačna raspodjela opterećenja na dvostruko napajanom vodu.

Tok proračuna kombinirane mreže, tj. mreže koja se sastoji od više prstenova, pojmih vodova, ogranka i sl., može se odvijati prema shemi prikazanoj na sl. 40 c-f, gdje je proračun objašnjen i brojčano. Postupak teče tako da se najprije opterećenja prebace u čvorove mreže, a zatim se mreža transformiranjem postupno pojednostavnjuje (v. *Elektrotehnika, Električni krugovi*).

Proračun kompliciranih i velikih mreža za koje postoje i egzaktna (v. *Električni krugovi*) i približne metode, zahtijeva po pravilu velik utrošak radnog vremena. Iz tog se razloga za proračune ovakvih mreža primjenjuju mrežni analizatori (v. *Analizatori, mrežni*) koji omogućavaju modeliranje prilika u mreži i time brze i lake proračune na temelju izmjerenih veličina.

Uvjeti napona za vodove izmjenične struje. Trofazni i jednofazni vodovi niskog napona (do 1 kV) proračunavaju se tako da se uzmu u obzir samo omska (djelatna) i induktivna komponenta otpora. Pad napona sastoji se prema vektorskom dijagramu na sl. 41 od dviju komponenata: pada napona u omskom otporu ($I R$), koji je u fazi sa strujom I , i pada napona u induktivnom otporu ($I X$), koji je fazno pomaknut za 90° prema struji. U niskonaponskim mrežama obično se zanemaruje utjecaj pomaka faze između napona na početku i na kraju voda i poistovjećuje se pad napona i gubitak (razlika) napona.

Relativni pad napona u_r u jednofaznim i trofaznim vodovima koji su na kraju opterećeni izračunava se prema relaciji

$$u_r = K \left(R' \cos \varphi + X_L' \sin \varphi \frac{P_s l}{U^2} \right), \quad (14)$$

koja se dobije pomoću izraza (9) ako se u njega uvrsti umjesto R' izraz ($R' \cos \varphi + X_L' \sin \varphi$), a M nadomjesti produktom $P_s l$.

Presjek vodiča može se izračunati iz izraza

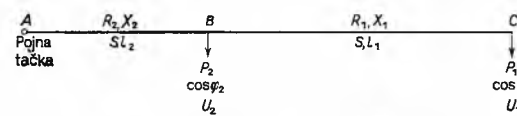
$$S = \frac{K q \cos \varphi P_s l}{u_r U^2 - K X_L' \sin \varphi P_s l}, \quad (15)$$

koji se dobije iz izraza (14) ako se umjesto R' uvrsti q/S , gdje K znači faktor (za trofazni sistem pri simetričnom opterećenju = 1, a za jednofazni = 2), R' radni otpor jednog vodiča po jedinici duljine, X_L' induktivni otpor jednog vodiča po jedinici duljine, $\cos \varphi$ faktor snage potrošača, l ukupna duljina voda, P_s opterećenje (snaga) potrošača, U pogonski napon na mjestu priključka potrošača (kod trofaznog sistema linijski napon, kod jednofaznog napon između vodiča), q specifični radni otpor.

U proračunima niskonaponskih distributivnih mreža može se po pravilu s dovoljnom tačnošću primijeniti prosječni faktor snage za sve vrste potrošača.

Tablica 3
TOK Približnog proračuna visokonaponskog voda

1. Shema voda



2. Moment opterećenja na duljini B—C: $M_B = P_1 l_1$ [MVA · km]
3. Relativni pad napona na duljini B—C reduciran na napon U_1 prema izrazu (17): $U_{p1} = U_{p1} \cdot 100\%$
4. Relativni gubitak snage na duljini B—C reduciran na opterećenje $P_1 \cos \varphi_1$ prema izrazu (18): $p_{r1} = p_{r1} \cdot 100\%$
5. Napon u tački B: $U_1 (1 + u_{r1}) = U_B$ [kV]
6. Radno opterećenje P u tački B: $P_1 \cos \varphi (1 + p_{r1}) + P_2 \cos \varphi = P_B$ [MW]
7. Jalovo opterećenje P_q u tački B: $P_1 \sin \varphi + P_2 \sin \varphi = P_{qB}$ [MVA]
8. Prividno opterećenje P_s u tački $\sqrt{P_B^2 + P_{qB}^2} = P_{sB}$ [MVA]
9. Faktor snage u tački B: $P_B/P_{sB} = \cos \varphi_B$
10. Moment opterećenja na duljini A—B: $M_A = P_B \cdot l_2$
11. Relativni pad napona na duljini A—B reduciran na napon U_1 prema izrazu (17) uzimajući u račun P_B , $\cos \varphi_B$, U_B : $u_{r1} = u_{r1} \cdot 100\%$
12. Relativni gubitak snage na duljini A—B reduciran na opterećenje $P_1 \cos \varphi_1$ prema izrazu (18) uzimajući u račun P_B , $\cos \varphi_B$, U_B : $p_{r1} = p_{r1} \cdot 100\%$
13. Ukupni relativni pad napona: $u_{r1} + u_{r2} = u_r = u_r \cdot 100\%$
14. Ukupni relativni gubitak snage: $p_{r1} + p_{r2} = p_r = p_r \cdot 100\%$
15. Napon u tački A: $U_1 (1 + u_r) = U_A$ [kV]

Proračun višestruko opterećenih trofaznih i jednofaznih vodova konstantnog presjeka analogan je proračunu istosmjernih vodova u slučaju da se primjenjuje prosječan faktor snage, ako se u izrazu (14) umjesto $P_s l$ uvrsti

$$\Sigma M = \sum_{i=1}^n P_{si} l_i. \quad (16)$$

Proračun zatvorenih (prstenastih) vodova s konstantnim presjekom napajanih iz jedne pojne tačke također se izvodi na analogan način kao proračun takvih istosmjernih vodova ako se s dovoljnom tačnošću mogu primijeniti prosječni faktor snage i već navedene jednadžbe (13) i (14). Ako primjena prosječnog faktora snage ne zadovoljava traženu tačnost, proračun niskonaponskih mreža treba provesti po metodama koje su navedene u nastavku pri proračunima distributivnih mreža visokog napona. Za proračunavanje kompliciranih kombinacija prstenastih vodova s dvije ili više pojmih tačaka preporuča se upotreba mrežnih analizatora.

Trofazni i jednofazni vodovi visokog napona (od 1 do 35 kV). U proračunima takvih distributivnih vodova može se u općenitom slučaju još zanemariti utjecaj kapaciteta na naponske prilike, ali se ne može zanemariti pomak faze φ_v između napona U_1 na početku i U_2 na kraju voda jer je kod tih vodova $X_L > R$.

Pad napona na kraju opterećenih trofaznih i jednofaznih vodova koji su napajani s jedne strane određen je izrazom (sl. 41)

$$u = \frac{u_v}{\cos \varphi_v} \approx u_v (1 + \frac{1}{2} \tan^2 \varphi_v)$$

ili relativni pad napona

$$u_r = K \left(R' \cos \varphi + X_L' \sin \varphi \right) \frac{P_s l}{U^2} + \frac{1}{2} \left[K (X_L' \cos \varphi - R' \sin \varphi) \frac{P_s l^2}{U^2} \right], \quad (17)$$

gdje K znači faktor (za uravnoteženi trofazni sistem = 1, za jednofazni = 2), P_s prividno opterećenje (snaga) potrošača, l ukupna duljina voda, U pogonski napon na mjestu priključka potrošača (za trofazni sistem: linijski napon; za jednofazni sistem: napon između vodiča), $P_s l$ moment opterećenja, R' radni otpor po jedinici duljine jednog vodiča, X_L' induktivni otpor po jedinici duljine jednog vodiča, $\cos \varphi$ faktor snage potrošača.

Relativni gubitak snage u vodu $p_r = p/P_s$, (gdje p znači gubitak snage zbog ukupne razlike napona a P ukupno prenošenu snagu) iznosi

$$p_r = \frac{u_v I}{U I \cos \varphi} = \frac{R'}{\cos \varphi} \cdot \frac{P_s I}{U^2} \quad (18)$$

Približni proračun trofaznih i jednofaznih vodova konstantnog presjeka opterećenih na više mjesta i napajanih s jedne strane može se provesti pomoću izraza (16) i (17) tako da se proračunava korak po korak svaki dio voda između mjesta priključka potrošača prema shemi rada prikazanoj na tabl. 3.

Određivanje raspodjele opterećenja i naponskih prilika zatvorenih (prstenastih) vodova napajanih s jedne ili više strana vrši se obično na mrežnom analizatoru jer je za numeričko računanje bez stroja utrošak vremena vrlo velik.

Uvjeti ugrižavanja vodiča. Otperteljivost vodiča zračnih vodova i kabela trajnim strujama određena je na osnovi teorijskih istraživanja i praktičkih iskustava. Vrijednosti trajno dopuštenih struja navedene su u tablicama za vodiče zračnih vodova i za vodiče kabela (v. *Dalekovodi; Električni vodovi*).

Ekonomski uvjeti. Prenos energije preko nekog voda vrši se, prema Kelvinovom zakonu, uz najmanje godišnje troškove ako su troškovi godišnjih gubitaka energije u vodovima jednaki godišnjim troškovima amortizacije osnovnih sredstava. Prema tome za vod višestruko (na više mjesta) opterećen i napajan s jedne strane vrijedi izraz:

$$\vartheta T_g a \sum_{i=1}^n 3 i_x l_x \cdot \frac{\varrho}{S} = A S l p. \quad (19)$$

Iz izraza (19) slijedi i izraz za tzv. ekonomsku gustoću struje:

$$J_e = \frac{I}{S} = \frac{P_s}{\sqrt{3} U S} = \sqrt{\frac{A p}{\varrho b T a}}. \quad (20)$$

U jednadžbama (19), (20) i (21) je b faktor raspodjele opterećenja:

$$b = \frac{\sum 3 i_x^2 l_x}{I^2 l}, \quad (21)$$

i_x struja u dijelu voda x , l_x duljina dijela voda x , ϱ specifični radni otpor vodiča, S presjek vodiča, ϑ faktor gubitaka (godišnji gubici energije podijeljeni s produktom gubitaka snage pri maksimalnom opterećenju i godišnjeg vremena upotrebe), T_g godišnje vrijeme upotrebe, a cijena električne energije, A specifični troškovi voda po jedinici duljine i presjeka: $A = (A_{s1} + A_{s2}) / (S_1 - S_2)$; A_{s1} , A_{s2} specifični troškovi po jedinici duljine voda sa presjekom vodiča S_1 , S_2 ; l ukupna duljina voda, p relativni godišnji troškovi (kamati i anuiteti, otpisi i održavanje voda u odnosu prema cijeni investicije), I ukupna struja na početku voda, P_s prividno opterećenje (snaga) na početku voda i U pogonski napon na početku voda.

Podaci o faktoru raspodjele opterećenja b dati su na sl. 42. Na slici 43 prikazan je dijagram pomoću kojeg se može odrediti faktor gubitaka ϑ na osnovi faktora opterećenja $m = T_m / T_g$ (om-

Shema voda	Faktor raspodjele b	
	Trofazni sistem	Istosmjerni i jednofazni sistem
	300	200
	1,88	125
	1,75	177
	1,55	103
	1,00	066

Sl. 42. Vrijednosti faktora raspodjele b za razne slučajeve raspodjele opterećenja uzduž voda

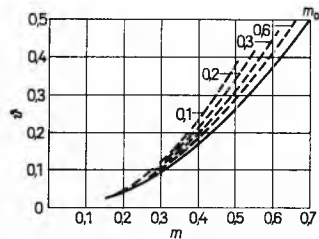
jera između upotrebnog vremena vršnog opterećenja i godišnjeg vremena upotrebe) i faktora varijacije m_0 (minimalno kroz vršno opterećenje).

Kao cijenu električne energije treba staviti u izraz (19) stvarnu (nabavnu) cijenu električne energije koja se prenosi promatranim vodom. Orijentacione vrijednosti ekonomske gustoće struje koje se upotrebljavaju u SFRJ jesu za trofazne vodove u mrežama niskog napona: za Cu 2,0...2,8 A/mm² i za Al 1,2...1,6 A/mm², a za trofazne vodove u mrežama visokog napona do 35 kV: za Cu 1,8...2,5 A/mm² i za Al 1,0...1,2 A/mm². Manje vrijednosti vrijede za zračne vodove, a veće za kabele.

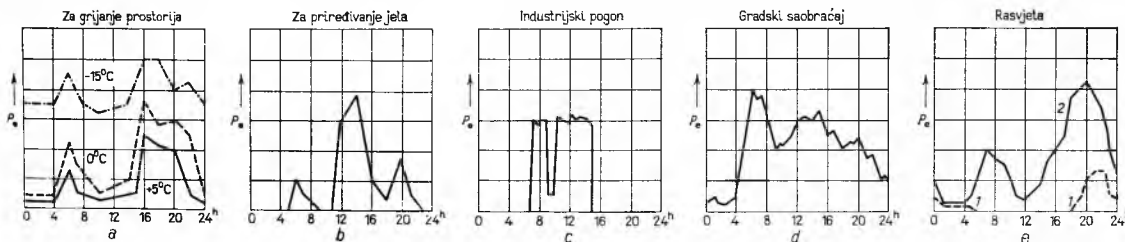
Energetska podloga i karakteristični odnosi

Dijagram opterećenja. Po pravilu, distributivne mreže namiruju potrebe i zahtjeve potrošača, od najmanjih do najvećih, u pogledu električne energije. Planiranje i projektiranje distributivnog sistema koji će odgovarati tom zadatku zahtijeva u prvom redu poznavanje karakteristika potrošnje svih priključenih potrošača. Da bi se, pak, ta karakteristika potrošnje odredila, potrebno je poznavati namjenu električne energije kod potrošača. Kako se električna energija može pretvoriti u niz drugih vrsta energije (toplinsku, mehaničku, svjetlosnu, kemijsku i zvučnu), njena je primjena veoma široka. Osim mogućnosti raznolike primjene, za potrošnju električne energije karakteristična je činjenica da se njezin iznos mijenja u toku vremena, tj. svakog časa, dana, mjeseca, svake godine. Ta promjena uvjetovana je nizom okolnosti: klimatskim uvjetima, životnim navikama ljudi, svojstvima procesa proizvodnje, itd. Pokazalo se praktičnim da se promjena potrošnje prikazuje grafički crtanjem momentanih vrijednosti opterećenja u ovisnosti od vremena, $P(t)$, tj. *krivuljama ili dijagramima opterećenja*. Ovakvi dijagrami vjeran su prikaz energetskog zbivanja oko zadovoljavanja potražnje potrošača za električnom energijom i stoga su podesni ne samo za analizu svih karakteristika potrošnje nego omogućavaju i uvid u okolnosti u kojima se odvija opskrba potrošača.

Utjecaj okolnosti i specifičnosti uvjeta potrošnje može se razjasniti na nizu karakterističnih primjera. Dijagrami opterećenja na sl. 44 a prikazuju ovisnost potreba električne energije za grijanje prostorija o dobu dana i vanjskoj temperaturi, u stanu obitelji čiji je pretežan broj članova zaposlen u radnom vremenu od 7 do 15h. Vidljiva je pojačana potreba za toplinom ujutro, prije odlaska na rad. Zatim se potreba pri hladnom vremenu nešto smanji a pri toplijem vremenu gotovo nestaje, a u osobito velikoj mjeri opet se pojavljuje u doba povratka s rada i za vrijeme boravka većine članova obitelji u stanu. U noći se potreba za toplinom smanjuje. Navedene krivulje daju jasan uvid u dvije bitne okolnosti života obitelji iz primjera: utjecaj radnog vremena zaposlenih članova obitelji i utjecaj vanjske temperature. Primjer na sl. 44 b pruža uvid u tok dnevnih potreba za toplinom u svrhe priređivanja jela u obitelji iz prethodnog primjera. Najveća je potreba u podnevnim satima, nešto manja u večernjim a vrlo mala u jutarnjim satima. U ovom slučaju utjecaj godišnjeg doba, tačnije: vanjske temperature, neznatan je. Dalja dva primjera odnose se na potrebe za mehaničkom energijom. Na sl.



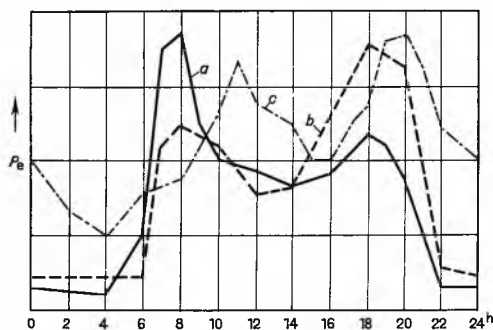
Sl. 43. Vrijednosti faktora gubitaka u odnosu na faktor opterećenja m i faktor varijacije m_0



Sl. 44. Dnevne krivulje potreba električne energije raznih potrošača

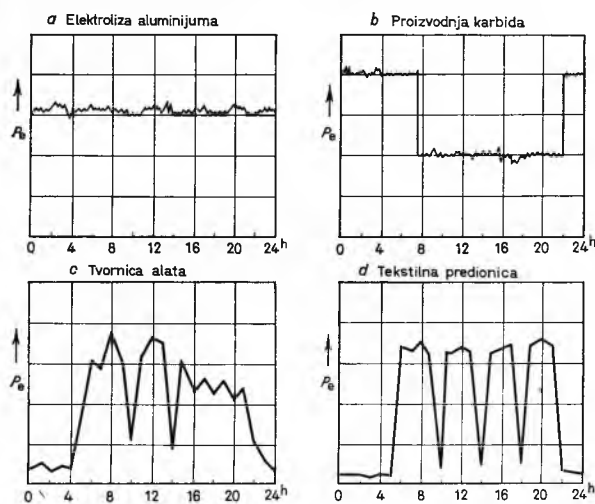
44 c krivulja predstavlja potrebe za pogonskom snagom nekog industrijskog pogona koji radi u jednoj smjeni. Opadanje potrošnje za vrijeme odmora na krivulji je osobito jasno vidljivo. Krivulja opterećenja na sl. 44 d karakteristična je za saobraćaj (tramvaj, trolejbus) u velikom gradu. Iz dijagrama se vidi da se stanovništvo najviše koristi saobraćajnim sredstvima u jutarnjim satima, da se produženo koristi njima u podnevnim satima, kada različita zvanja u različito vrijeme prekidaju ili završavaju rad, a minimalno se njime koristi u noćnim satima. Na sl. 44 e krivulja potreba električne energije za rasvjetu nekog većeg naselja (domaćinstava, trgovina, ulica, industrijskih pogona, ustanova, itd.) karakteristična je kako po veličini maksimalne potrebe u večernjim satima tako i po različitosti potreba za rasvjetom u zimsko i ljetno doba.

Dijagrami opterećenja na sl. 45 prikazuju odvijanje dnevne potrošnje električne energije skupina potrošača u kojima prevladavaju karakteristike najbrojnije vrste potrošača, odnosno



Sl. 45. Dijagrami opterećenja $P_e(t)$ karakterističnih skupina potrošača. a) Gradski četvrt s pretežno administrativnim ustanovama, uredima, školama, poslovnica i sl. (zima); b) gradski četvrt pretežno s trgovinama, robnim kućama, servisima i sl. (zima); c) stambena gradska četvrt (zima)

potrošača s najintenzivnijom potrošnjom. Tako, npr., u gradskoj četvrti gdje prevladavaju ustanove (škole, poslovnice) vršno opterećenje skupine pojavljuje se u zimskom danu u jutarnjim satima (sl. 45, a), dok tog istog dana trgovine, robne kuće i sl. (sl. 45, b) daju pečat potrošnje s večernjim vršnim opterećenjem, kad je promet vrlo velik, a opterećenje pojačavaju reklame, rasvjeta, itd. Istovremeno (sl. 45, c) opterećenje stambene četvrti ima sve karakteristike potrošnje domaćinstava, tj. dva izrazita vršna opterećenja: podnevno i večernje.

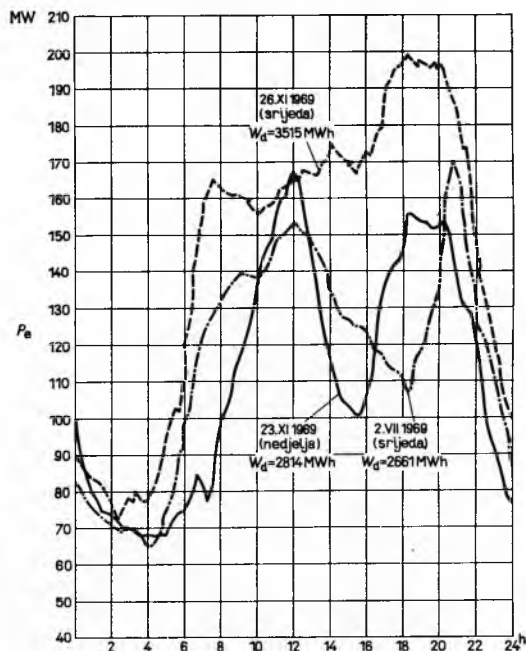


Sl. 46. Dijagrami opterećenja $P_e(t)$ karakterističnih industrijskih potrošača

Dijagrami opterećenja industrijskih potrošača odraz su tehnologije proizvodnje: elektroliza aluminijuma, npr., zahtijeva konstantnu potrošnju električne energije tokom dana (sl. 46 a), a isto tako i proizvodnja karbida, s tom razlikom što prikazani

primjer potrošnje u tvornici karbida (sl. 46 b) ukazuje na činjenicu da se taj pogon može koristiti razlikom između dnevnih i noćnih tarifnih stavova za potrošnju električne energije. U tvornici alata s dijagramom opterećenja prikazanom na sl. 46 c radi se u dvije smjene, ali je očito da postoji razlika između tehnologija rada u prijedpodnevnoj i u poslijepodnevnoj smjeni, tj. faza rada u proizvodnji alata koja je određena za drugu smjenu zahtijeva drugačiju potrošnju električne energije nego faza u prvoj smjeni. U tekstilnoj predionici iz primjera na sl. 46 d intenzitet potrošnje električne energije za vrijeme rada obiju smjena gotovo je konstantan. Prekidi u potrošnji nastaju za vrijeme odmora i dok se obavlja smjena radnika.

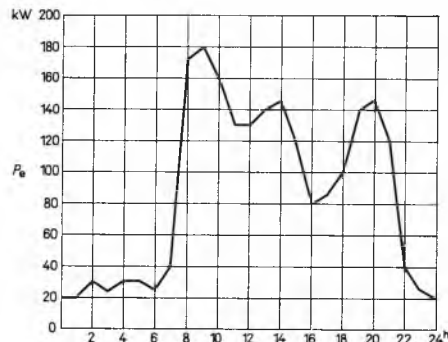
Dijagrami opterećenja većih područja na kojima su zastupljene sve vrste potrošača odraz su osnovne strukture potrošača (široka potrošnja, industrija) i ostalih uvjeta koji su navedeni na početku



Sl. 47. Dijagrami jednodnevnog opterećenja područja Zagreba u različito godišnje doba i različite dane u tjednu

(klima, standard, životne navike stanovništva, itd.). Na dijagramima jednog takvog područja (Zagreb, sl. 47) ilustrativno je pokazano koliko se bitno razlikuje dijagram opterećenja snimljen u nedjelju (neradni dan) od dijagrama snimljenog u srijedu (radni dan): različita su ne samo vršna opterećenja i dnevne potrošnje električne energije, nego i doba vršnih opterećenja. Očito je da u nedjelju dominiraju karakteristike domaćinstava, a u radne se dane sumiraju opterećenja domaćinstava i ostalih potrošača. Godišnja doba i godišnji odmori također utječu na potražnju električne energije. Dijagram opterećenja jesenskog dana znatno se razlikuje od ljetnog dnevnog dijagrama opterećenja (sl. 47).

Za praktične svrhe najpogodniju sliku toka promjene opterećenja crtaju tzv. *maksigrafi* (npr. Landis & Gyr) koji u vremen-



Sl. 48. Krivulja jednodnevnog opterećenja crtana pomoću maksigrafa

skim razmacima od četvrt ili pola sata ucrtavaju srednje opterećenje u tom razmaku vremena (sl. 48). Ako nema maksigrafa, može se za neke svrhe, npr. za neku analizu opterećenja, uz upotrebu običnog brojlara energije doći do istih rezultata očitavanjem količina utrošene električne energije u određenim vremenskim razmacima (četvrt ili pola sata).

Maksimalno ili vršno opterećenje sistema zove se najveća snaga koja je u tom sistemu stvarno tražena u određenom vremenskom intervalu, npr. u toku jedne godine.

Faktor opterećenja i faktor varijacije. Ako se sa $P_{\max}$ označi vršno ili maksimalno opterećenje nekog potrošača ili dijela distributivnog sistema (transformatora, voda) koje se pojavilo u toku jedne godine, sa W_g godišnja potrošnja električne energije u istom razdoblju, a sa T_g period jedne godine (izražen u koherentnoj jedinici vremena) **faktor opterećenja** m definiran je izrazom

$$m = \frac{W_g}{T_g P_{\max}}, \quad (22)$$

ili, ako se godišnja potrošnja definira kao produkt vršnog opterećenja i tzv. **vremena upotrebe vršnog opterećenja**, T_m , faktor je opterećenja m definiran odnosom:

$$m = \frac{T_m}{T_g}. \quad (23)$$

Faktor varijacije m_0 druga je karakteristična veličina, a dobije se iz omjera minimalnog i maksimalnog godišnjeg opterećenja:

$$m_0 = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}. \quad (24)$$

Na osnovi analize ostvarenih dijagrama može se pokazati da između faktora opterećenja i faktora varijacije postoji približan odnos

$$m_0 = (0,8 \dots 1,0) m^2. \quad (25)$$

Navedeni faktori služe u proračunima gubitaka u mreži za određivanje faktora gubitaka θ (v. sl. 43).

Instalirana snaga i faktor potražnje. Instalirana ili **priključna snaga** (P_{inst}) suma je nazivnih snaga svih električnih trošila koja se u nekoj instalaciji ili mreži ili sistemu mogu istovremeno priključiti. Instalirana snaga može se izraziti u različitim jedinicama (W, VA, PS), već prema tome kako to potreba iziskuje. Instalirana snaga predstavlja najveću moguću potražnju (najveće moguće opterećenje) koja teorijski može nastupiti. Međutim, sva trošila električne energije u istom sistemu po pravilu nisu priključena istovremeno, niti su ona uvijek opterećena svojom nazivnom snagom.

Faktor potražnje, f_p , zove se omjer između maksimalnog opterećenja i instalirane snage:

$$f_p = \frac{P_{\max}}{P_{\text{inst}}}. \quad (26)$$

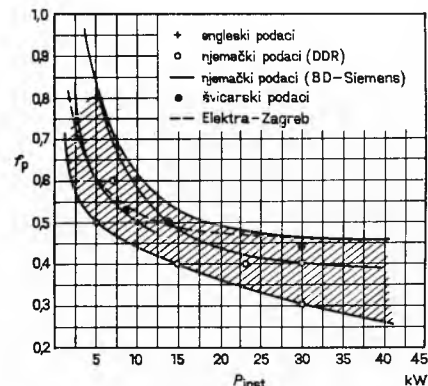
Poznavanje veličine faktora potražnje pomaže u procjeni maksimalnog opterećenja kada su poznate instalirane snage. Faktor potražnje redovito je manji od 1, rijetko iznosi 1, a sasvim iznimno prelazi 1, i to u slučaju kad su trošila preopterećena (npr. preopterećeni elektromotori). Što je veća suma instaliranih snaga, i što je veći broj pojedinih trošila koja ulaze u tu sumu, to je faktor potražnje manji, jer je to manja vjerojatnost da će sva trošila biti istovremeno priključena. Na iznos faktora potražnje elektromotornog pogona utječe ne samo broj motora toga pogona nego i način kako se ti motori upotrebljavaju. Ako u pogonu jedna grupa motora prema potrebi proizvodnog procesa radi istovremeno, ta se grupa može smatrati jednom većom motornom jedinicom i to dakako ima za posljedicu velik faktor potražnje. U malom stanu, jedno- ili dvosobnom, faktor potražnje je veći nego u trosobnom ili četverosobnom. U dva jednaka stana u kojima su i instalirane snage jednake, faktori potražnje su sasvim različiti ako se u jednom od njih električna energija primjenjuje za grijanje prostorija i pripremu tople vode, a u drugom se za iste svrhe upotrebljava plin ili neki drugi oblik energije. Prema tome, veličina faktora potražnje u domaćinstvima ovisi ne samo o broju aparata i trošila i veličini stana nego i o strukturi instalirane snage (rasvjeta, kuhanje, grijanje i priprema tople vode, električni aparati).

U literaturi postoji niz podataka o veličini faktora potražnje. Kao primjer navedeni su u tabl. 4.: američki, engleski, njemački (DDR) i švicarski podaci. Treba napomenuti da njemački i švicarski podaci imaju karakter smjernica za planiranje i projektiranje.

Tablica 4
PODACI IZ RAZNIH ZEMALJA O FAKTORU POTRAŽNJE

Potrošač	Primjena el. energije	P_{inst} , kW	Faktor potražnje f_p
Američki podaci:			
manji stan	rasvjeta, aparati, bez kuhanja	—	0,50—0,75
veći stan	rasvjeta, aparati, bez kuhanja	—	0,40—0,65
veći stan	rasvjeta, aparati, kuhanje	—	0,35—0,60
Engleski podaci:			
stan	—	do 2,5	0,60—0,70
stan	—	2,5—10	0,6
stan	—	iznad 10	0,5
Njemački podaci:			
stan sa više soba u gradu	opskrba plinom, sa ili bez centralne opskrbe toplinom	15	0,4
	bez plina, sa centralnom opskrbom topline	23	0,4
	bez plina, bez centralne opskrbe toplinom	30	0,4
stan s jednom sobom u gradu	sa plinom	5	0,5
	bez plina	7	0,6
stan sa više soba izvan grada	bez plina	30	0,3
Švicarski podaci:			
stan	—	8,33	0,53
stan	—	13,03	0,5
stan	—	29,90	0,44

Isti karakter imaju i zapadnonjemački podaci, kao i podaci s kojima se računa na području distributivnog poduzeća »Elektra-Zagreb« (sl. 49). Za brodove v. članak *Brodsko elektrotehnika*, TE 2, str. 504.



Sl. 49. Sumarni prikaz veličina faktora potražnje (f_p) u odnosu na instaliranu snagu P_{inst}

Za niz komunalnih potrošača, za neke industrije i za veće poljoprivredne potrošače postoje iskustveni podaci o faktoru potražnje, dok za veći dio industrije u određivanju faktora treba provesti analizu tehnološkog procesa proizvodnje.

Vršno opterećenje i faktor istovremenosti. Pojedini potrošači različito iskorištavaju instaliranu snagu P_i svojih trošila, i to, prema svojim potrebama, bilo u cijelosti bilo djelomično, tako da se može općenito reći da je iskorištavanje instalirane snage varijabilno po vremenu i po intenzitetu. Otuda i činjenica da se samo jedan dio opterećenja pojedinih potrošača pojavljuje u vršnom opterećenju skupine potrošača, pa čak i onda kad ta skupina sadržava potrošače jednakih ili sličnih karakteristika trošenja

električne energije. Tako, npr., u skupini domaćinstava vršna opterećenja pojedinih domaćinstava ne pojavljuju se istovremeno, jer ni životne navike članova tih domaćinstava nisu iste. Što je više pojedinačnih potrošača, to je manja vjerojatnost istovremene pojave njihovih vršnih opterećenja u opterećenju cijele skupine. Prema tome, postoji prirodno izjednačenje opterećenja i taj svojstveni energetski fenomen definiran je matematički pomoću faktora istovremenosti f_n :

$$f_n = \frac{P_{\max n}}{\sum_{i=1}^n P_{\max i}} \leq 1. \quad (27)$$

Vršno je opterećenje skupine potrošača ($P_{\max n}$), naime, manje ili najviše jednako sumi individualnih vršnih opterećenja ($P_{\max i}$).

Mogućnost izjednačavanja vršnih vrijednosti postoji i između skupina potrošača nekog konzumnog područja koje su različite po karakteristikama trošenja električne energije, analogno izjednačavanju u skupini istih karakteristika, s razlikom što je ta mogućnost općenito veća, pa je treba proučiti od slučaja do slučaja.

Kad broj domaćinstava iznosi n i kad su ona približno jednaka po instaliranim snagama i individualnim vršnim opterećenjima ($P_{\max i}$) ili kad se računa s prosječnim vršnim opterećenjem domaćinstava P_v u nekoj skupini, faktor istovremenosti može se odrediti i izrazima

$$f_n = \frac{P_{\max i}}{n P_{\max i}} \quad \text{ili} \quad f_n = \frac{P_{\max i}}{n P_v} \quad (28)$$

Podijeli li se vršno opterećenje skupine potrošača $P_{\max n}$ brojem domaćinstava n , dobije se prosječni udio P_{ud} svakog pojedinog domaćinstava u vršnom opterećenju skupine. Primjenom izraza (28) dobije se:

$$P_{ud} = \frac{P_{\max i}}{n} = P_{\max i} \cdot f_n \quad (29)$$

$$f_n = \frac{P_{ud}}{P_{\max i}}$$

Faktor istovremenosti određuje se uzimajući u obzir vrstu trošila i broj potrošača koji su priključeni na istu mrežu ili njezin dio. U stvari, matematičkom obradi pokazuju da taj faktor ovisi ne samo o broju potrošača n nego i o dnevnom vremenu upotrebe vršnog opterećenja, t_m , odnosno o relativnoj upotrebi vršnog opterećenja, t_r , tj.

$$f_n = f(t_r), \quad (30)$$

gdje je t_r definirano kao

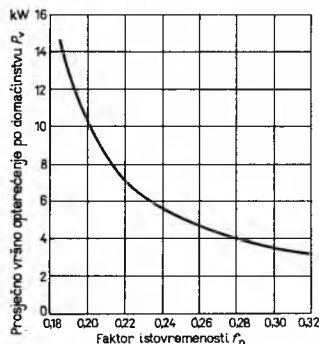
$$t_r = \frac{t_m}{T_d} = \frac{W_g}{T_g P_{\max i}}, \quad (31)$$

gdje T_d znači period jednog dana, T_g period jedne godine dana (oboje u istim koherentnim jedinicama vremena), W_g godišnju potrošnju električne energije i $P_{\max i}$ individualno vršno opterećenje. Grafički prikaz relacije (30) dat je na sl. 50.

Za određivanje faktora istovremenosti neke skupine domaćinstava često se upotrebljava *Rusokova relacija*

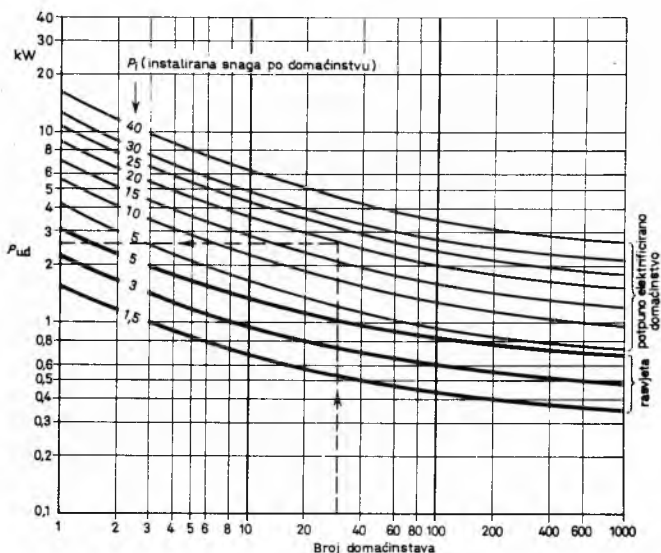
$$f_n = f_\infty + (1 - f_\infty) \frac{1}{\sqrt{n}}, \quad (32)$$

u kojoj f_∞ predstavlja faktor istovremenosti za vrlo velik broj

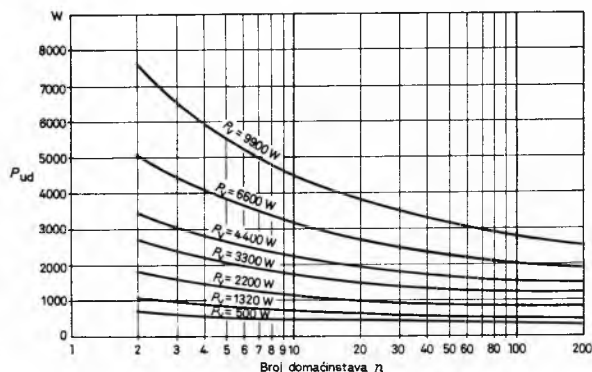


Sl. 51. Faktor istovremenosti f_n za vrlo velik broj domaćinstava u ovisnosti o prosječnom vršnom opterećenju domaćinstava P_v (Poduzeće za distribuciju električne energije «Elektra-Zagreb»)

Tako se može, npr., polazeći od broja domaćinstava n i u njima instalirane snage P_1 (sl. 52) ili prosječnog vršnog opterećenja pojedinog domaćinstava P_v (sl. 53) doći do prosječnog udjela jednog domaćinstava P_{ud} u vršnom opterećenju skupine



Sl. 52. Prosječni udio jednog domaćinstava u vršnom opterećenju skupine domaćinstava (specifično opterećenje) P_{ud} u ovisnosti o broju domaćinstava n i instaliranoj snazi P_1 (Zapadna Njemačka)



Sl. 53. Prosječni udio jednog domaćinstava P_{ud} u vršnom opterećenju skupine domaćinstava (specifično opterećenje) u ovisnosti o broju domaćinstava n i prosječnom vršnom opterećenju domaćinstava P_v (Poduzeće za distribuciju električne energije «Elektra-Zagreb»)

domaćinstava. Iz broja domaćinstava n i prosječnih vršnih opterećenja domaćinstava P_v (sl. 54) može se opet dobiti npr. vršno opterećenje skupine domaćinstava $P_{\max n}$, itd.

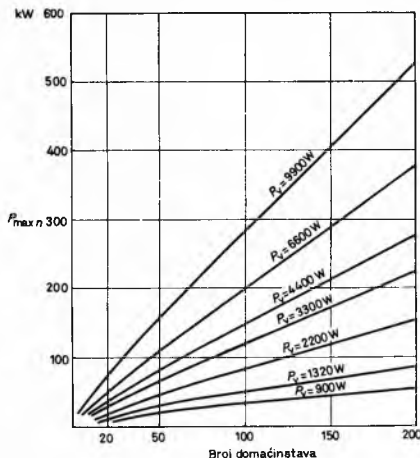
Iznalaženje energetskih karakteristika domaćinstava.

U pogonima distributivnih mreža od velikog su interesa istraživanja osnovnih karakteristika, strukturnih odnosa i zakonitosti potrošnje električne energije. Takva istraživanja služe za ocjenu ekonomskih i tehničkih zahvata kojima se može utjecati na racionalniji raspored potrošnje i povoljnije iskorištenje postojeće mreže (tarife, daljinsko upravljanje i dr.), kao i za sigurnije procjenjivanje budućeg razvoja konzuma i optimalno usmjeravanje razvoja mreže.

Za veće, koncentrirane potrošače takva istraživanja mogu se vršiti direktnim mjerenjima na podesnim mjestima distributivne mreže ili kod samih potrošača, ali na domaćinstva, najbrojnije i prostorno najviše rasprostranjene potrošače, metode direktnih mjerenja kod samih potrošača praktički su neprimjenjive. S druge strane, daleko najveći dio distributivnih mreža izgrađen je i gradi se radi domaćinstava. Tendencije razvoja potrošnje električne energije u domaćinstvima pokazuju da će utjecaj ove kategorije na razvoj i ekonomiku distributivnih mreža biti s vremenom sve veći i složeniji što više raste potrošnja, što se veći broj štednjaka, spremnika tople vode, grijalica i drugih aparata priključuje na mrežu.

Istraživanja karakteristika potrošnje električne energije u domaćinstvima vrše se u dva osnovna smjera: *istraživanja strukture potrošnje* električne energije i *istraživanja veličine i karaktera opterećenja* koje domaćinstvo izaziva u mreži.

Metode istraživanja su različite, već prema posebnim ciljevima i prema tačnosti koja se želi postići. Međutim, osnovu svih istraživanja čini obrada velikog broja podataka, prikupljenih bilo putem ankete bilo mjerenjima u mreži. Podaci se podijele tako da u istu grupu dolaze podaci dobiveni u domaćinstvima s jednakom strukturom u pogledu instaliranih trošila; razlike među srednjim vrijednostima podataka u grupama (srednjim ukupnim potrošcima električne energije po grupama) pripisuju se razlikama među strukturama domaćinstava u pogledu instaliranih trošila. Metodama matematičke statistike može se iz prikupljenih i na navedeni način grupiranih podataka odrediti prosječni potrošak svakog trošila u promatranim domaćinstvima, a upoređivanjem tako određenih prosječnih potrošaka pojedinih trošila s njihovom prosječnom instaliranom snagom može se, opet metodama matematičke statistike, odrediti koji će maksimalni udio od ukupnog broja tih aparata s određenom vjerojatnošću biti istovremeno uključen, tj. koje će vjerojatno biti vršno opterećenje mreže tim aparatima (uz pretpostavku, dakako, da će se prosječno u domaćinstvima trošila i u budućnosti upotrebljavati na isti način kao u istraženom uzorku svih domaćinstava). Za tačnost rezultata određivanja prosječnog potroška pojedinih trošila potrebno je da broj promatranih domaćinstava bude dovoljno velik i u svim grupama bar približno jednak; da među domaćinstvima postoje određene razlike u strukturi u pogledu trošila, tako da se mogu podijeliti u grupe; da se ne uzmu u obzir domaćinstva



Sl. 54. Vršno opterećenje skupine domaćinstava $P_{\max}$ u ovisnosti o broju domaćinstava n i prosječnim vršnim opterećenjima domaćinstava P_v (Poduzeće za distribuciju električne energije «Elektra-Zagreb»)

kojima potrošnja energije ekstremno odstupa od potroška ostalih domaćinstava u grupi i da sva domaćinstva posjeduju jednako dugo, bar kroz jednu obračunsku godinu, sve zatečene aparate s kojima ulaze u račun.

Tablica 5

STRUKTURA I ZASTUPLJENOST ELEKTRIČNIH APARATA U DOMAĆINSTVIMA NEKIH GRADOVA SFRJ*

Vrsta aparata	Tuzla		Sisak		Karlovac	
	Pros. instal. snaga W	Zastupljenost %	Pros. instal. snaga W	Zastupljenost %	Pros. instal. snaga W	Zastupljenost %
Rasvjeta	245	100	460	100	673	100
Glačalo	516	81,5	900	100	1000	98,2
Štednjak	5960	42,3	6670	57,1	7391	95,9
Spremnik tople vode (kupaonski)	1500	30,7	1500	10,5	1580	92,1
Televizor	155	18,4	180	46,8	180	89,8
Hladnjak	144	15,4	108	43,4	114	86,8
Usisač	244	17,2	210	27,8	270	82,2
Radio	51	86,3	60	98	60	81,1
Stroj za pranje rublja	2260	2,9	2300	12,1	2248	69,2
Infra-grijač	—	—	1000	2,4	1500	56,5
Mikser	—	—	20	4,4	132	41,7
Grijalica	1730	12,4	2000	9,8	2020	8,9
Kuhalo	786	40,7	1450	47,1	1611	7,6
Spremnik tople vode (kuhinjski)	—	—	1500	4,6	1500	7,1
Laštilica	—	—	180	2,7	125	4,1
Električni lonac	731	2,8	800	11	500	0,5

* Prema rezultatima istraživanja u Institutu za elektroprivredu — Zagreb, u god. 1967, 1968 i 1969.

Tablica 6

PROSJEČNA GODIŠNJA POTROŠNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE POJEDINIH APARATA U NEKIM GRADOVIMA SFRJ

Naziv aparata	Potrošnja, kWh/god.		
	Tuzla	Sisak	Karlovac
Štednjak	1100	1100	1300
Kuhalo	350	600	250
Spremnik tople vode (kupaonski)	750	900	1300
Hladnjak	750	550	350
Grijalica	650	500	550
Stroj za pranje rublja	120	240	280
Rasvjeta i ostali aparati	500	345	500

Tablica 7

PROSJEČNA GODIŠNJA POTROŠNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE APARATA U «RAČUNSKOM» (PROSJEČNOM) DOMAĆINSTVU NEKIH GRADOVA SFRJ

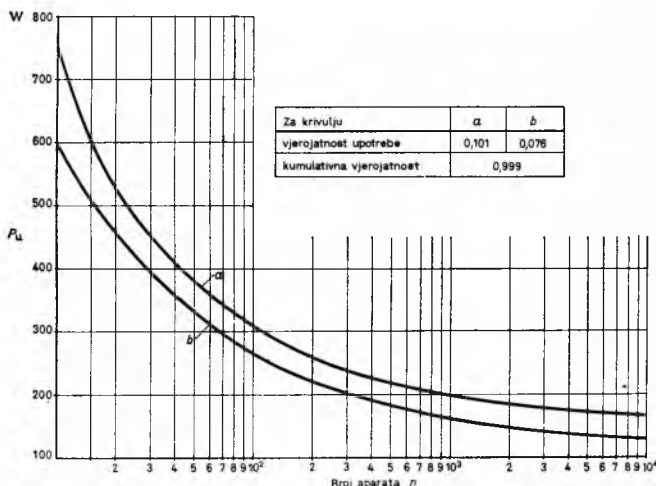
Naziv aparata	Potrošnja, kWh/god		
	Tuzla	Sisak	Karlovac
Štednjak	465	627	1245
Kuhalo	142	282	19
Spremnik tople vode (kupaonski)	230	95	1200
Hladnjak	115	244	304
Grijalica	81	49	49
Stroj za pranje rublja	3	34	19
Rasvjeta i ostali aparati	500	345	500
Ukupno:	1536	1676	3336

Instalirani se aparati u svim kućanstvima iste grupe ne upotrebljavaju na isti način, već različito prema potrebama i navikama svakog pojedinog korisnika. Stoga među pojedinačnim vrijednostima potroška energije od kojih se obrazuje prosjek postoje znatne razlike, a broj istovremeno uključenih aparata slučajna je veličina koja se može ocijeniti samo primjenom računa vjerojatnosti. Zbog toga se i za određivanje prosječnog potroška pojedinih trošila i za ocjenjivanje vjerojatnog vršnog opterećenja mreže moraju upotrijebiti pogodne metode matematičke statistike.

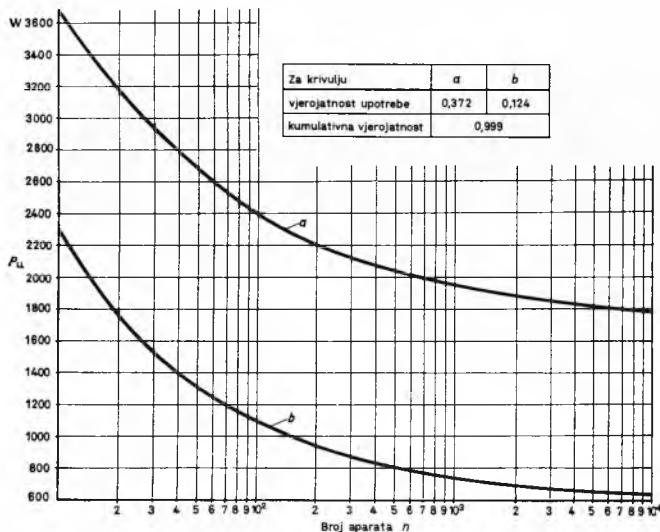
Problem matematičkostatističkog ocjenjivanja vršnog opterećenja svodi se na ovo. Ako je u nekom ogranku mreže priključen određen broj domaćinstava s ukupno n_a različitih aparata i ako njihova ukupna instalirana snaga iznosi P_{inst} , postavlj

se pitanje: koliki je najveći broj aparata n_k koji će s velikom vjerojatnošću biti istovremeno uključeni. Pri tom je faktor potražnje određen omjerom

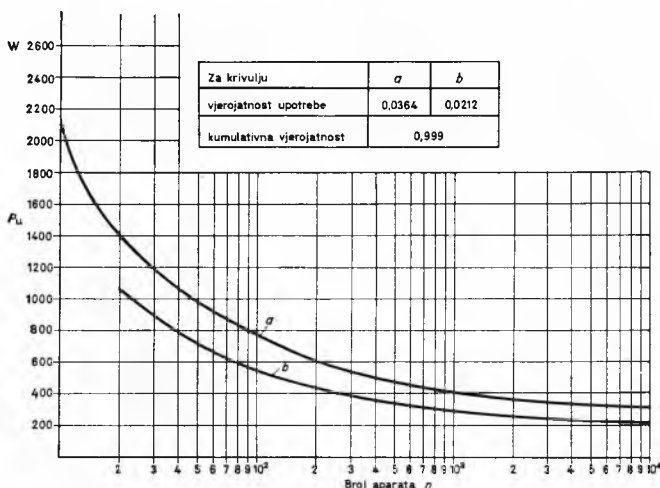
$$f_p = n_k/n_a, \quad (33)$$



Sl. 55. Udio P_u spremnika tople vode ($P_{inst} = 1500$ W, $W_g = 1000$ kWh u god.) u vršnom opterećenju mreže kao funkcija broja aparata za dvije vjerojatnosti upotrebe a i b



Sl. 56. Udio P_u električne peći za grijanje ($P_{inst} = 4600$ W, $W_g = 5000$ kWh u god.) u vršnom opterećenju mreže kao funkcija broja aparata za dvije vjerojatnosti upotrebe a i b



Sl. 57. Udio P_u štednjaka ($P_{inst} = 7000$ W, $W_g = 1300$ kWh u god.) u vršnom opterećenju mreže kao funkcija broja aparata za dvije vjerojatnosti upotrebe a i b

a vršno opterećenje relacijom

$$P_{maxn} = f_p \cdot P_{inst}. \quad (34)$$

Za određivanje veličine n_k potrebno je poznavati polazne podatke: broj i vrstu aparata u mreži, njihove instalirane snage i prosječne godišnje potroške energije. Traženi kritični broj n_k istovremeno uključenih aparata određuje se primjenom matematičke statistike i računa vjerojatnosti (v. *Statistika*), dok se prosječni godišnji potrošak određenog aparata dobiva kako je naprijed navedeno.

Rezultati takvih istraživanja u nekim od gradova Jugoslavije prikazani su u tablicama 5, 6 i 9 i slikama 55, 56 i 57.

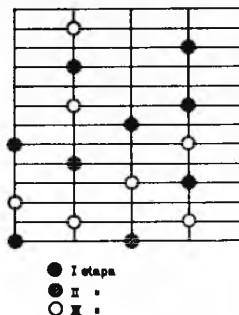
Procjena perspektivnog konzuma

Polaznu osnovu u planiranju distributivnih mreža predstavljaju predviđena opterećenja i predviđena potrošnja električne energije.

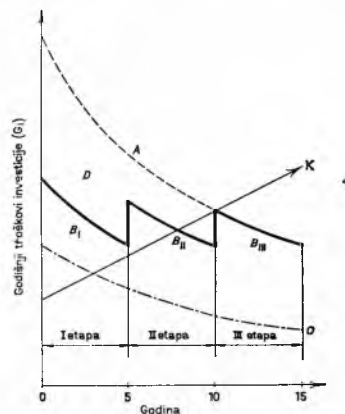
Prognoza opterećenja i potrošnje električne energije, tj. procjena perspektivnog konzuma, predstavlja vrlo delikatan dio rada na planiranju mreže jer se na njemu temelji izbor oblika mreže i dimenzioniranje njezinih elemenata.

U prvom redu treba odrediti za koje vremensko razdoblje treba provesti procjenu perspektivnog konzuma i oblikovati odgovarajuću mrežu. S druge strane, vijek trajanja pojedinih elemenata distributivne mreže kreće se u granicama od 25 do 40 godina, te je poželjno da se svaki element iskoristi do kraja u toku njegova vijeka trajanja. Tako, npr., trajanje transformatora iznosi ~ 25 godina, kabela 30, 40 pa i 50 godina (već prema načinu njegovog polaganja i eksploatiranja), nadzemnog dalekovoda 30 i 40 godina, sklopke 25 godina, zgrade i preko 50 godina, itd.

Pri projektiranju mreže treba tražiti kompromisno rješenje dvaju suprotnih zahtjeva. Procjena konzuma to je realnija što je kraće vremensko razdoblje na koje se odnosi, a oblikovanje i dimenzioniranje mreže, da bi se što bolje iskoristila trajnost elemenata mreže, traži da se planiranje mreže odnosi na što duže vremensko razdoblje. Rješenje predstavlja oblikovanje mreže koje omogućuje što elastičniju etapnu izgradnju. U tom je slučaju



Sl. 58. Shema distributivne mreže (380/220 V) s etapnom interpolacijom pojmih transformatorskih stanica (10/0,4 kV)



Sl. 59. Godišnji troškovi investicije G_1 koji učestvuju u cijeni svakog kWh u slučaju izgradnje mreže u jednoj etapi (A) i u slučaju izgradnje u tri etape (B) uz linearni porast konzuma (K). C godišnji troškovi dijela mreže koji se ne može graditi u etapama, D ušteda na godišnjim troškovima investicije u slučaju etapne izgradnje

rizik investitora najmanji, a zbog eventualne pogrešne procjene konzuma rentabilnost eksploatacije mreže ne dolazi toliko u pitanje, pa prema tome nije od bitne važnosti da li se procjena

konzuma odnosi na period od 20, 30 ili 40 godina. Na sl. 58 i sl. 59 prikazan je pojednostavljeni primjer etapne izgradnje.

U pogledu vremenskih razdoblja za koja se prognoze izrađuju razlikuju se kratkoročne, srednjoročne i dugoročne prognoze.

Kratkoročne prognoze obuhvaćaju razdoblja od jedne do tri godine. Takve prognoze služe pretežno za to da se izradi neki operativni plan ili da se pristupi prema programu izgradnji v-ćih objekata mreže ili da se formiraju dovoljna financijska sredstva. Sve te namjene kratkoročnih prognoza u stvari su dio srednjoročnog ili dugoročnog plana, u njega se uklapaju ili predstavljaju njegovu kontrolu.

Srednjoročne prognoze protežu se na razdoblja od 5 do 10 godina i čine bazu za duže operativne planove izgradnje i rekonstrukcije mreža ili njezine modernizacije. Planovi izgradnje mreža bazirani na srednjoročnim prognozama smatraju se realnima.

Dugoročne prognoze, za razdoblja duža od 10 pa sve do 30 godina, osnova su za planove mreža koji imaju karakter studija i omogućuju da se dobije približna slika o općim tendencijama vjerojatnog razvoja mreža i njihovih elemenata. Ove prognoze obično se poklapaju s urbanističkim i regionalnim planovima razvoja.

Metode prognoziranja potrošnje električne energije mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine: globalne i analitičke metode.

Globalne metode prognoziranja zasnovane su na primjeni određene prosječne stope godišnjeg prirasta potrošnje električne energije za odabrani period vremena, a ta se stopa odabire analizom razvoja potrošnje u prošlosti. Pretpostavlja se, naime, da postoji velika vjerojatnost da će budući razvoj potrošnje teći po istom zakonu kao i u prošlosti. Ovakve metode su tačne ako postoji sigurnost da su podaci o procesu razvoja u prošlosti dobiveni na osnovi dovoljno velikog broja elemenata. Tako, npr., u većim gradovima veliki broj potrošača, iako s različitim karakterom potrošnje, pruža garanciju da se ove metode mogu uspješno primijeniti. Globalne metode vrlo su raširene, ali način na koji se utvrđuje stopa godišnjeg prirasta vrlo je različit. Negdje je ta stopa konstantna, negdje ima tendenciju opadanja, a negdje se stopa prirasta stavlja u ovisnost o razvoju različitih faktora o kojima ovisi potrošnja električne energije (npr. nacionalni dohodak), te se prognoza izračunava prema više ili manje kompleksnim matematičkim izrazima. Općenito je poznat matematički izraz za izračunavanje globalnog konzuma ovaj:

$$W_t = W_0 (1 + p)^t, \quad (35)$$

gdje t znači broj godina za koji se prognozira potrošnja, W_0 potrošnju u početnoj (u 0-toj) godini, W_t potrošnju na kraju promatranog perioda (u t -toj godini) i p konstantni godišnji prirast potrošnje u promatranom periodu od t godina. Stopa godišnjeg prirasta od 7,2% vrlo je poznata i često se upotrebljava da bi se dobila orijentaciona brojka pri općenitim i grubim procjenama desetogodišnjeg budućeg konzuma (ta stopa odgovara udvostručenju konzuma za deset godina).

Za izradu dugoročnih prognoza potrošnje električne energije u okviru nekog teritorija primjenjuje se u novije vrijeme tzv. *logistička krivulja*.

Zaključak da se potrošnja električne energije odvija po zakonu logističke krivulje temelji se na rezultatima ispitivanja do kojih su na sličan način došli statističari i ispitivači ovakvih problema i na drugim područjima (npr. biološkog rasta populacije). Po tom je zaključku vremenski razvoj potrošnje električne energije u općim i osnovnim crtama prikazan krivuljom koja ima oblik slova S sa produženim krakovima s jedne i s druge strane. U tom razvoju razlikuju se tri temeljna razdoblja (sl. 60).

Prvo razdoblje karakterizira eksponencijalni prirast, u drugom ili »infleksionom« razdoblju ispoljava se brzi ali stabilni i vremenski jednolični prirast potrošnje električne energije. U trećem, »asimptotskom« razdoblju proces potrošnje približava se nekoj zasićenosti. Podetni analitički izraz kojim se mogu obuhvatiti sva tri razvojna razdoblja glasi:

$$\log W_t = \frac{k}{1 + m e^{-at}}, \quad (36)$$

gdje W_t znači ukupnu potrošnju električne energije u godini t , a k , m i a su konstante određene na temelju statističkih podataka o potrošnji u prošlosti.

Analitičke metode prognoziranja karakterizirane su time što se prije svega provode pojedinačne analize i ispitivanja potreba za električnom energijom raznih vrsta potrošača, bilo na

osnovi statističkih podataka o potrošnji u prošlosti bilo na osnovi planskih ili npr. anketom utvrđenih zahtjeva za energijom u budućnosti, te se zatim sumiraju tim putem dobivene potrebe.

Potrošnja električne energije na nekom području dijeli se na dvije osnovne vrste potrošnje: na industrijsku potrošnju i široku potrošnju.

Buduće potrebe *industrijskih potrošača* ispituju se bilo neposrednim anketiranjem bilo tako da se na osnovi društvenih planova razvoja industrije i uvidom u planiranu proizvodnju procjenjuju potrebe za električnom energijom uzimajući u obzir specifičnu potrošnju po jedinici proizvoda: kWh/toni ili kWh/komadu. Specifični potrošak električne energije za nekoliko proizvodnih postupaka, odabranih kao primjer, iznosi: za dobivanje aluminijuma 14...18 kWh/kg, za rafinaciju bakra 280...350 kWh/t, za taljenje aluminijuma 400...600 kWh/t, za toplinsku obradu aluminijuma 150...250 kWh/t, za toplinsku obradu čelika 150...250 kWh/t, za pečenje porculana 2000...4000 kWh/t, za dobivanje čelika SM-postupkom 25...35 kWh/t, za proizvodnju portland-cementa 75...120 kWh/t, za proizvodnju celuloze 250...350 kWh/t, za proizvodnju rotacijskog papira (uključivši proizvodnju drvenjače) 1200...1700 kWh/t, za piljenje oblovine 20...56 kWh/t, za proizvodnju stakla 100 kWh/t.

Potrošači široke potrošnje jesu u prvom redu domaćinstva, a zatim ostali potrošači koji se kao i domaćinstva nalaze rasipani na cijelom području grada ili naselja, a to su obrt i servisi, poslovne, društvene, školske, administrativne i zdravstvene ustanove i organizacije, vodovod, tramvaj (trolejbus) i javna rasvjeta.

U primjeni analitičke metode na kategoriju *domaćinstava* potrebno je klasificirati domaćinstva prema postignutom stupnju elektrificiranosti i na osnovi toga postaviti standarde potrošnje električne energije u budućnosti uzimajući u obzir faktore koji utječu na potrošnju električne energije: broj članova domaćinstva, standard života, veličinu i komfornu opremljenost stana i vrstu primjene električne energije. Ako se radi o području na kojem stanovi i domaćinstva u času procjenjivanja buduće potrošnje još ne postoje, navedene faktore treba procijeniti.

Na takvim osnovama izrađeni su npr. standardi potrošnje električne energije za područje distributivnog poduzeća »Elektra-Zagreb« koji se uz stanovit ograničenja primjenjuju u nizu gradova i područja Jugoslavije. Ti standardi vrijede na prosječni broj članova domaćinstva (4 člana) i prosječnu veličinu stana (60 m²), a veličina potrošnje električne energije kategorizirana je u njima na četiri stepena: početni, niski, srednji i visoki standard potrošnje. Ti stepeni potrošnje vezani su sa stupnjem elektrificiranosti stana te predstavljaju direktni odraz životnog standarda domaćinstva. Početni standard potrošnje električne energije smatra se izvanrednom kategorijom potrošnje koja se pojavljuje u početnoj fazi elektrifikacije nekog područja sa stanovništvom relativno niskog životnog standarda (seoska naselja). Ostala tri standarda potrošnje smatraju se redovnim kategorijama razvoja potrošnje električne energije u našim domaćinstvima, a napose u onim koja žive na gradskim područjima. U spomenutim standardima vrsta primjene električne energije uzeta je u obzir tri kategorije: rasvjeta (R), električne aparate (A), kuhanje (K) i grijanje prostorija i pripremu tople vode (G). — 1. vrsta: električna energija primjenjuje se za rasvjetu (R), električne aparate (A), kuhanje (K) i grijanje prostorija i pripremu tople vode (G). — 2. vrsta: električna energija primjenjuje se za rasvjetu (R), električne aparate (A) i kuhanje (K) a za grijanje prostorija i pripremu tople vode upotrebljava se neki drugi oblik energije (plin, klasično grijanje, toplovod i sl.). — 3. vrsta: električna energija primjenjuje se za rasvjetu (R) i električne aparate (A) a za kuhanje, grijanje prostorija i pripremu tople vode upotrebljava se neki drugi oblik energije.

Opisani standardi navedeni su u tablici 8.

Tablica 8

KARAKTERISTIKE STANDARDA POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE U DOMAĆINSTVIMA DISTRIBUTIVNOG PODUZEĆA »ELEKTRA-ZAGREB«

	Standard potrošnje	1. vrsta (R, A, K, G)	2. vrsta (R, A, K)	3. vrsta (R, A)
Potrošnja električne energije, kWh/god.	Početni Niski Srednji Visoki	3 000 5 600 8 000	550 1 400 2 600 3 300	650 1 000 1 300
Instalirana snaga, W	Početni Niski Srednji Visoki	5 800 13 300 21 300	1 140 3 300 8 140 13 300	1 750 3 300 3 300 5 800
Vršno opterećenje na brojilu, W	Početni Niski Srednji Visoki	3 300 6 600 9 900	900 2 200 4 400 6 600	1 320 2 200 2 200 3 300

(R = rasvjeta, A = električni aparati, K = kuhanje, G = grijanje)

Perspektivna potrošnja električne energije *ostalih potrošača široke potrošnje* (obrt i servisi, poslovne, društvene, administrativne organizacije, itd.) također se nastoji standardizirati. Tako su npr. za potrebe grubih planiranja u distributivnom poduzeću »Elektra-Zagreb« u upotrebi karakteristične veličine potrošnje svedene na jedno domaćinstvo, prikazane u tabl. 9.

Tablica 9
KARAKTERISTIKE POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE OSTALIH POTROŠAČA ŠIROKE POTROŠNJE PREMA STANDARDIMA DISTRIBUTIVNOG PODUZEĆA »ELEKTRA-ZAGREB«

Poslovni, trgovački i administrativni centri srednjih i većih gradova (iznad 50 000 stanovnika): potrošnja: 2200 kWh/god./dom. opterećenje: 1000 W/dom.
Poslovni, trgovački i administrativni centri manjih gradova (ispod 50 000 stanovnika), mikrorajoni većih gradova, prosjek za šire područje većih gradova: potrošnja: 1000 kWh/god./dom. opterećenje: 500 W/dom.
Stambene četvrti većih gradova, prosjek za šire područje manjih gradova: potrošnja: 500 kWh/god./dom. opterećenje: 250 W/dom.

Planiranje distributivnih mreža

Distributivne se mreže moraju planirati tako da one budu što ekonomičnije, u pogonu sigurne, da održavanje napona u njima bude kvalitetno i da se mogu prilagoditi budućem porastu opterećenja.

Klasifikacija potrošača. Plan mreže određen je u prvom redu vrstom potrošača, pri čemu se pod potrošačem ne razumijeva samo pojedini potrošač nego i grupe potrošača. Podjela potrošača prema vrsti, opterećenju i naponu priključka data je u tabl. 10.

Gustoća opterećenja. Druga veličina koja utječe na plan mreže jest gustoća opterećenja, tj. opterećenje po jedinici površine opskrbljenog područja. U tabl. 11 navedene su prosječne gustoće opterećenja (MVA/km²) koje pokazuju kako gustoće opterećenja ovise o strukturi opskrbnih područja.

Izbor distributivnih napona nekog područja ograničen je standardnim naponima. Kao distributivni napon niskonaponskih mreža primjenjuje se u evropskim zemljama posljednjih nekoliko decenija skoro isključivo napon 380/220 V. U distributivnim mrežama visokog napona upotrebljavaju se naponi 10, 20 i 35 kV, a vrlo često i napon 110 kV koji, uslijed velikih koncentracija opterećenja, poprima distributivni karakter. Budući da direktna transformacija od 110 kV na napon 380/220 V tehnički i ekonomski nije opravdana, vrlo često se u planiranju današnjih mreža postavlja pitanje koji napon i koliko napona je svrsishodno da se primijeni između najvišeg (110 kV) i najnižeg (380/220 V) distributivnog napona. Analize rađene sa svrhom da se problem riješi pokazale su u velikom broju slučajeva da tzv. *tronaponska distribucija* 110/10/0,38 kV ili 110/20/0,38 kV, već prema vrsti

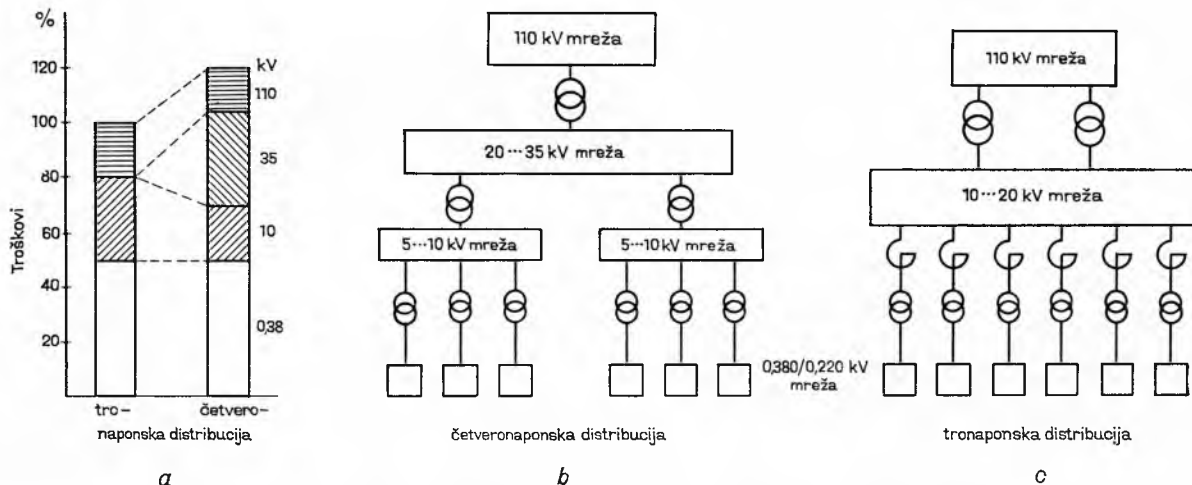
Tablica 10
VRSTE POTROŠAČA, OPTEREĆENJA I NAPONI NA KOJE SE PRIKLJUČUJU POTROŠAČI

Grupa potrošača	Vrsta potrošača	Opterećenje	Napon priklj.
mali potrošači	domaćinstva, obrt, trgovine, manji hoteli, poslovnice itd.	do 30 kVA	380/220 V
srednji potrošači	mjesne mreže, veće radionice, industrijski pogoni, administrativne ustanove, robne kuće	od 30 do 100 kVA	380/220 V u gradovima, 14...20 kV u pokrajini
veliki potrošači	gradovi do 25 000 stanovnika, veliki industrijski pogoni, velike poslovne i administrativne zgrade, bolnice i sl.	od 100 do 5000 kVA	10 do 35 kV
vrlo veliki potrošači	gradovi iznad 25 000 stanovnika, velike industrije, elektrificirane željeznice, pokrajinska područja	5000 kVA	35 do 110 kV

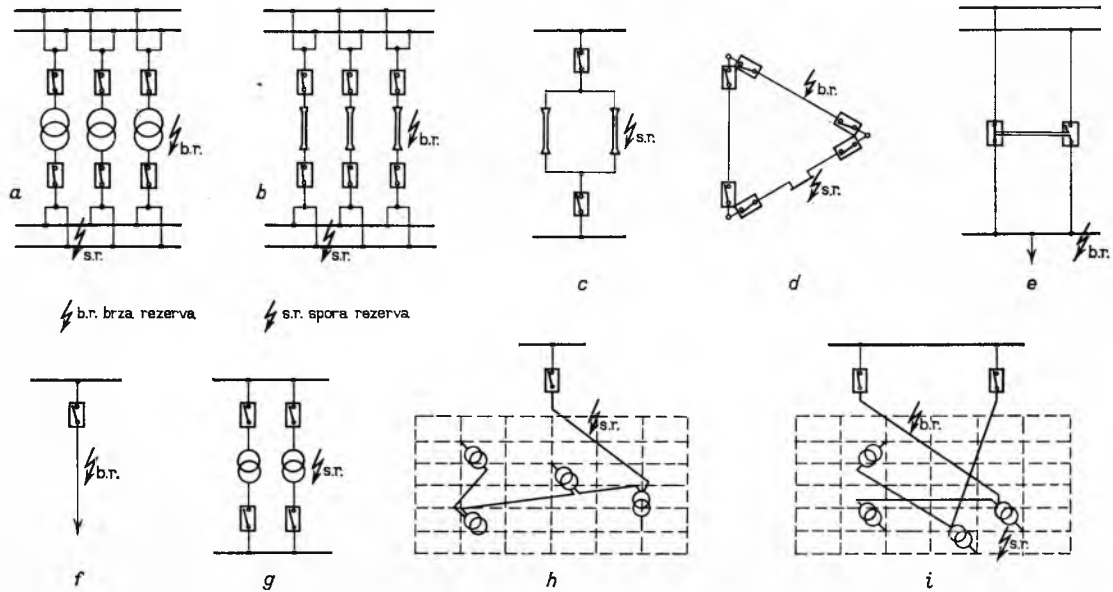
Tablica 11
PROSJEČNE GUSTOĆE OPTEREĆENJA (MVA/km²) GRADSKIH PODRUČJA

Struktura opskrbnog područja	Veliki gradovi preko 300 000 stanovnika	Srednji gradovi 50...300 000 stanovnika	Manji gradovi do 50 000 stanovnika
gradski centri	6...20	4...10	3...8
gusto izgrađena gradska stambena područja	4...8	3...6	2...4
narijetko izgrađena stambena područja s električnim kuhanjem	2...4	2...4	2...4
bez električne kuhinje	0,5...2	0,5...2	0,5...2

potrošača i gustoći opterećenja, ima očite ekonomske prednosti pred *četveronaponskom distribucijom*, tj. distribucijom 110/35/10/0,4 kV (sl. 61 a). Međutim, ovaj zaključak vrijedi bez rezerve samo za nove mreže. Provedba četveronaponske distribucije (110/35/10/0,4 kV) može biti ekonomski potpuno opravdana kad su u mrežu 35 kV u toku razvoja u prošlosti već investirana znatna sredstva. Naime, tehnički je lako provedivo, a ekonomski opravdano, da se u toku porasta opterećenja bez bitnog povećanja investicija interpoliraju nove stanice 30/10 kV u mrežu 10 kV. Na sl. 61 b i c prikazane su u općenitom obliku sheme četveronaponske i tronaponske distribucije velikog grada.



Sl. 61. Usporedba troškova i općenitih shema tronaponske i četveronaponske distribucije velikog grada



Sl. 62. Pogonske rezerve u distributivnoj mreži: b. r. brza rezerva, s. r. spora rezerva

U pokrajinskim mrežama pokazalo se u posljednje vrijeme da je opravdano uvođenje samo jednog međunapona (110/20/0,4 kV u SR Sloveniji).

U distributivnim mrežama velikih industrija gdje su u upotrebi elektromotori velikih snaga (iznad 250 kVA), primjena napona 6 kV pokazala se ekonomičnijom u odnosu prema naponu 10 kV, za razliku od gradskih mreža, gdje takvih motora po pravilu nema.

Naponske prilike. U mrežama *niskog napona* koje služe za opću opskrbu električnom energijom (380/220) pad napona od sabirnica transformatorske stanice do najudaljenijeg trošila ne smije, prema jugoslavenskim propisima, preći 6% (VDE: 5%). Budući da isti propisi ograničavaju pad napona u instalaciji potrošača na 3% (VDE: 2%), preostaje za niskonaponsku mrežu 3% kao gornja granica dozvoljenog pada napona. Pri planiranju gradskih kablskih mreža vrši se proračun obično s ovim vrijednostima, a rjeđe se uzimaju u obzir i niže. U pokrajinskim mjesnim mrežama i u mrežama gradskih predgrada (prizemne i jednokatne kuće) računa se i sa 4%. U industrijskim mrežama pad napona do posljednjeg elektromotora smije iznositi i do 7%. Taj se napon ne može kompenzirati transformatorima jer transformatori koji napajaju niskonaponske mreže, iz ekonomskih razloga, nemaju uređaje za regulaciju napona pod opterećenjem, već samo nekoliko otcjepa (v. *Transformator*).

U distributivnim mrežama *visokog napona* (10 do 35 kV) dopušta se pad napona između praznog hoda i punog opterećenja od 3 do 8%. Niža vrijednost odnosi se na gradske kablске mreže, a viša na pokrajinske zračne mreže. U mrežama 110 kV pad napona dozvoljen je i do 10%. Za smanjenje navedenih padova napona postoje na transformatorima, koji se nalaze u pojnim tačkama visokog napona, uređaji za regulaciju (v. *Transformator*). U tabl. 12 date su uobičajene vrijednosti opsega regulacije transformatora visokonaponskih mreža.

Tablica 12
TRANSFORMATORI S REGULACIJOM I BEZ NJE

Nazivni napon kV	Prenosni omjer U_1/U_2	Regulacija otcjepima %	Regulacija pod opterećenjem %
$U_1 = 110$ $U_2 = 10 \dots 35$	$U_1/U_2 + 5\%$	ne postoji	± 22
$U_1 = 10 \dots 35$ $U_2 = 6 \dots 20$	$U_1/U_2 + 5\%$	ne postoji	± 16
$U_1 = 6 \dots 20$ $U_2 = 0,38/0,22$	$U_1/U_2 + 5\%$	$\pm 4 \dots \pm 5$	—

Problem održavanja urednih naponskih prilika u distributivnim mrežama ne može se odvojiti od problema prenosa jalovih snaga. Naponske prilike su to povoljnije što je mreža više rastećena od jalovih snaga. To je razlog praksi da se u distributivnim mrežama primjenjuje kompenzacija jalovih snaga (popravlak lošeg faktora snage), i to što bliže potrošaču, a do vrijednosti $\cos \varphi = 0,95$.

Instalirane snage transformatora. Raspodjela električne energije na zadanom području može se izvesti ili malim brojem transformatorskih stanica velikih snaga transformacije, što traži mrežu s vodičima većih presjeka, ili većim brojem transformatorskih stanica malih snaga transformacije i mrežom pripadnih manjih presjeka. Ekonomski je povoljno rješenje u kojemu je zbroj troškova za stanice i za mrežu minimalno. U tabl. 13 navedene su snage transformatora uobičajene u jugoslavenskim distributivnim mrežama.

Pogonska rezerva. Sigurnost i kontinuitet u opskrbi potrošača električnom energijom zahtijeva da u distributivnim mrežama postoje pogonske rezerve. Razlikuju se: *brza rezerva*, koja u slučaju potrebe djeluje tako brzo da potrošač praktički ne osjeti prekid u opskrbi energijom, i *spora rezerva*, koja dolazi do izražaja tek nakon određenog vremena, unutar kojeg potrošač nema napajanja. Na sl. 62 ilustrirani su pojmovi brze i spore rezerve na nekoliko primjera. U paralelnom spoju više transformatora ili kabela (sl. 62 a i b) između dviju dvostrukih sabirnica sa selektivnom zaštitnom aparaturom postoji brza rezerva ako dode do kvara na transformatoru ili kabeu, a ako nastane kvar na sabirnicama, postoji samo spora rezerva jer se sabirničkim rastavljačem može manipulirati samo u neopterećenom stanju. Kada su dva kabela ili zračna voda priključena preko iste sklopke, postoji samo spora rezerva (sl. 62 c). Zamkaste mreže visokog napona opremljene kvalitetnom selektivnom zaštitom (sl. 62 d) imaju brzu rezervu za potrošače koji su priključeni u čvorovima, a sporu rezervu za potrošače uključene u vodove. Automatsko preklapanje potrošača od jednog nezavisnog dijela mreže na drugi (sl. 62 e) i brzo ponovno uklapanje u zračnim mrežama kad se radi o prolaznim dozemnim spojevima (sl. 62 f) imaju karakter brze rezerve. Stanice u zrakastim mrežama s rezervnim transformatorima (sl. 62 g) imaju sporu rezervu jer se općenito ne ugrađuje automatika ili visokokvalitetna zaštita. Jednostruko napajana zamkasta mreža (sl. 62 h) ima na visokonaponskoj strani sporu a višestruko napajana zamkasta mreža (sl. 62 i) brzu rezervu. Ako nastanu kvarovi u niskonaponskoj mreži, svi potrošači imaju brzu rezervu osim onih koji su priključeni na vod u kvaru. Brza ili spora rezerva određuje se prema važnosti i strukturi potrošača električne energije i njihovoj veličini u sistemu. Općenito, više se važnosti polaže na rezervu u visokonaponskim dijelovima mreže jer su tu, s obzirom na relativnu veličinu potrošnje i opterećenja, i specifični troškovi rezerve relativno mali. Međutim, treba imati na umu

Tablica 13
INSTALIRANE SNAGE TRANSFORMATORA U JUGOSLAVENSKIM
DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

Namjena distributivne mreže	Prenosni omjer kV/kV	Instalirane snage transformatora MVA
Pokrajinske mjesne mreže zračne izvedbe	$\frac{10 \cdots 20}{0,38/0,22}$	0,030...0,16
Kabelske mreže manjih gradova	$\frac{10 \cdots 20}{0,38/0,22}$	0,25...0,40
Kabelske mreže većih gradova	$\frac{10 \cdots 20}{0,38/0,22}$	0,40...0,63
Pokrajinske mreže visokog napona	$\frac{35}{10 \cdots 20}$	1,6...4,0
Mreže visokog napona u gradovima	$\frac{35}{10 \cdots 20}$	4...16
Pojne tačke distributivne mreže u pokrajini	$\frac{110}{35}$	16...40
Pojne tačke distributivne mreže u gradovima	$\frac{110}{35}$	20...63
Pojne tačke distributivne mreže u pokrajini	$\frac{110}{10 \cdots 20}$	16...20
Pojne tačke distributivne mreže u gradovima	$\frac{110}{10 \cdots 20}$	20...40

da se rezerve ne stvaraju samo dodavanjem transformatora ili vodova već i smišljenim oblikovanjem mreža tako da svaki od elemenata mreže predstavlja neku rezervu za ostale dijelove, pa ukupna ulaganja u rezerve ostaju u snošljivim granicama. Treba uzeti u obzir i sposobnost preopterećenja nekih elemenata mreže, npr. transformatora.

U određivanju potrebe za pogonskom rezervom važnu ulogu ima i ocjena sigurnosti u pogonu pojedinih elemenata mreže. Ta ocjena ovisi u prvom redu o poznavanju vjerojatnosti kvara, pri čemu treba znati da pojava kvara ne ovisi samo o kvalitetu i konstrukciji elemenata nego i o tome kako se oni održavaju i kako se njima rukuje. Poznavajući statistike kvarova, broj aparata, duljinu vodova itd., moguće je odrediti broj kvarova i ukupno trajanje prekida pogona T_p za određen vremenski period (npr. za 1 godinu) prema izrazu:

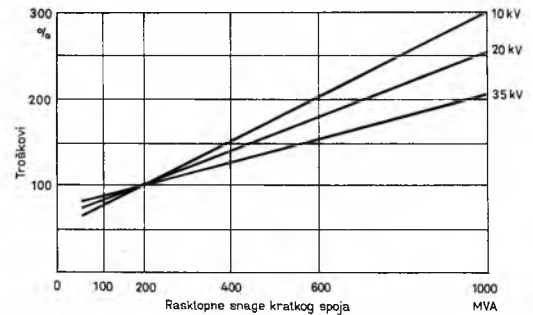
$$T_p = t n_k N, \quad (37)$$

gdje n_k znači broj kvarova na promatranom elementu u određenom vremenskom periodu, N broj elemenata ili broj kilometara na koji se odnosi broj kvarova n_k , t trajanje prekida kao posljedica jednog kvara. Ako se T_p podijeli s vremenskim periodom T za

koji se vrši proračun i brojem elemenata N , dobiva se vjerojatnost prekida pogona zbog kvara na jednom elementu:

$$p = \frac{T_p}{TN}. \quad (38)$$

Kratki spoj. Sve veće gustoće opterećenja distributivnih mreža i s time povezana povećanja prenosnih mreža i izvora električne energije imaju za posljedicu porast snage kratkog spoja. Cilj je ekonomičnog planiranja distributivnih mreža da snage kratkog spoja i njegovo trajanje smanji toliko da pojedini elementi mreže mogu biti termički dimenzionirani kako to zahtijeva normalni pogon, ili samo nešto malo jače. U tabl. 14 dati

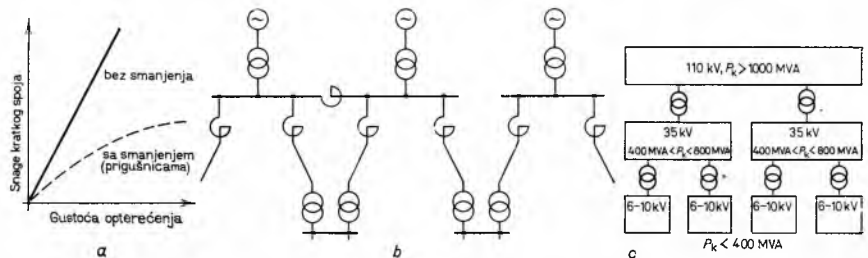


Sl. 63. Relativni troškovi rasklopne postrojenja s dvostrukim sabirnicama u ovisnosti o rasklopnoj snazi (200 MVA = 100%)

su najmanji presjeci bakarnih vodiča kabela 6...35 kV uvjetovani snagama (strujama) kratkog spoja i njihovim trajanjem.

Utjecaj snaga kratkog spoja na troškove izgradnje ilustriran je jednim primjerom na sl. 63.

U osnovi, postoje dva načina da se smanje snage kratkog spoja, čija je ovisnost o opterećenju principijelno prikazana na sl. 64 a:



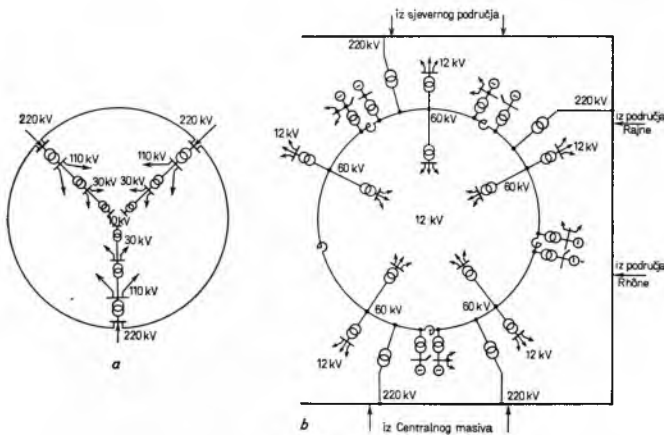
Sl. 64. Snage kratkog spoja u mreži. a Ovisnost snaga kratkog spoja o razvoju gustoće opterećenja (sa i bez smanjenja), b smanjenje snaga kratkog spoja primjenom prigušnica, c smanjenje snaga kratkog spoja P_k dijeljenjem mreže na dijelove

prvi, ugradnjom prigušnica (sl. 64 b) i drugi, dijeljenjem mreže na dijelove (sl. 64 c) tako da u tim dijelovima snage kratkog spoja ostanu unutar određenih granica.

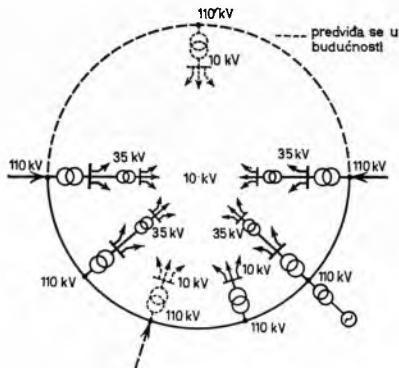
Primjeri izvedenih distributivnih mreža. Historijski razvoj, veličina područja, standard života i s time vezane veličine opterećenja utječu na stvaranje nekog distributivnog sistema. Primjer za to su distributivne mreže gradova. Distributivnoj mreži Stockholma (~1 000 000 stanovnika) osnovnu energetska sabirnicu čini prsten napona 220 kV (sl. 65 a) koji sabira energiju iz prenosne mreže i dalje je predaje u grad. Upotreba napona 220 kV uvjetovana je u ovom slučaju relativno velikim gustoćama opterećenja, a manje veličinom grada. U slučaju Pariza (više od 7 000 000 stanovnika) za razvoj mreže presudna je veličina grada a manje veličina potrošnje električne energije (sl. 65 b). U toku razvoja mreže stvarana je kružna energetska sabirnica 60 kV koju su napajale elektrane na području grada, a tek u periodu poslije drugog svjetskog rata superponirana je mreža 220 kV koja je omogućila dovod onih količina električne energije koje su sve veće potrebe grada zahtijevale. U Zagrebu je mreža napona 35 kV do 1960 predstavljala energetska kičmu u snabdijevanju električnom energijom (sl. 66). U kasnijem periodu to više nije bilo dovoljno pa se počeo stvarati kružni sistem mreže 110 kV,

Tablica 14
NAJMANJI PRESJECI BAKRENOG VODIČA KABELA 6...35 kV
UVJETOVANI STRUJAMA KRATKOG SPOJA I NJIHOVIM
TRAJANJEM

Trajanje struja kratkog spoja, s	0,5	1,0	1,5
Napon, kV	6 10 20 35	6 10 20 35	6 10 20 35
Presjek (mm ²) uz snagu kratkog spoja:			
100 MVA	95 35 16 —	120 50 25 —	150 95 50 35
200 MVA	150 70 35 25	240 95 50 35	300 150 95 50
400 MVA	300 120 70 35	400 185 95 50	— 300 150 95
600 MVA	— 185 95 70	— 240 150 95	— — 300 150
1000 MVA	— — 185 95	— — 240 150	— — — 300



Sl. 65. Shema distribucije električne energije na području velikih gradova. a Stockholm, b Pariz

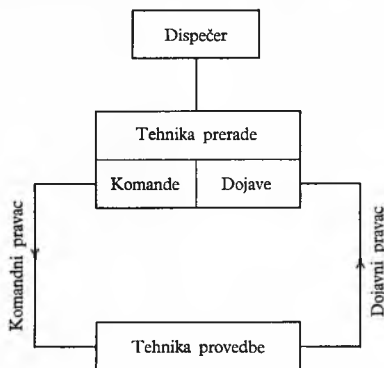


Sl. 66. Shema distribucije električne energije na području Zagreba

koji danas još nije potpun, ali će se brzo zatvoriti s obzirom na trend potrošnje električne energije na području grada.

Dispečerski centri distributivnih mreža

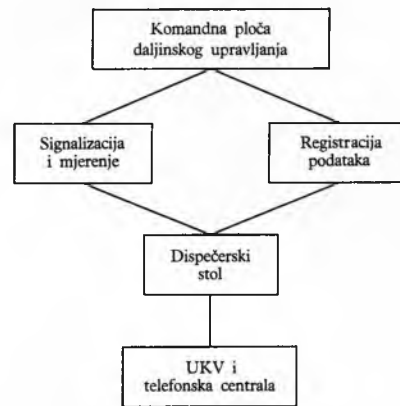
U distributivnim mrežama koje sadrže veliki broj elemenata, vodova i transformatorskih stanica na relativno malom području (obično su to mreže gradova iznad 100 000 stanovnika) izgrađuju se dispečerski centri, da bi upravljanje tim mrežama bilo jednostavno i efikasno u smislu održavanja neprekidnosti pogona i brzog eliminiranja kvarova. Ovi dispečerski centri razlikuju se



Sl. 67. Osnovni princip tehnike dispečerskog centra

od dispečerskih centara prenosnih mreža jer u distributivnim mrežama ne treba voditi računa o stabilitetu prenosa, regulaciji frekvencije, interkonekciji, ekonomiziranju proizvodnje i sl., ali treba imati pregled nad mnoštvom elemenata mreže i nad mnoštvom potrošača čija se potražnja za električnom energijom mijenja svakog trenutka po mjestu i po vremenu, pa prema tome treba voditi računa o optimalnoj raspodjeli električne energije, tj. raspo-

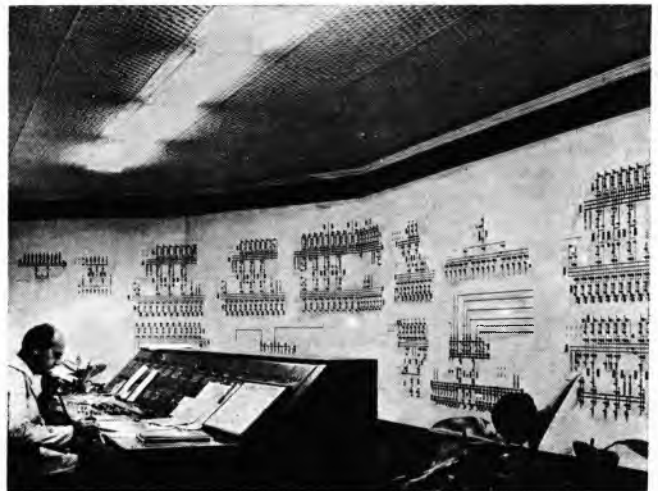
djeli uz minimalne gubitke. Osim toga, dispečerski centri omogućuju brze intervencije u mreži kad nastane kvar, što smanjuje gubitke uslijed neisporučene električne energije. U mrežama s dispečer-



Sl. 68. Osnovna shema dispečerskog centra

skim centrom otpadaju i troškovi uklopničarskih posada u nizu transformatorskih i rasklopnih stanica u mreži. I najzad, u dispečerskim centrima upravlja mrežom visokokvalitetno i odabrano osoblje, čime se višestruko podiže opći kvalitet upravljanja, a omogućena je primjena elektroničkih računala za obradu podataka, ekonomsku optimalizaciju i automatske komande.

Osnovni princip tehnike u dispečerskom centru prikazan je na sl. 67. Dojavnim ili informacionim pravcem šalju se informacije iz mreže (signali, mjerne veličine, potvrde izvršenih operacija i sl.) u centar gdje se prerađuju (tehnika prerade) da bi se



Sl. 69. Dispečerski centar distributivnog poduzeća električne energije 'Elektra-Zagreb'

dispečeru omogućilo donošenje odluke. Komandnim ili zapovjednim pravcem šalju se iz centra zapovijedi ili komande u postrojenje. U postrojenju posebni uređaji (tehnika provedbe) provode komandu, tj. posreduju izvršenje pogonske manipulacije. Na sl. 68 prikazana je osnovna shema sadržaja dispečerskog centra. Komandna ploča daljinskog upravljanja mjesto je s kojeg se upravlja određenim rasklopnim elementima mreže. Na ploči se redovito nalaze jednopolne sheme postrojenja kojima se upravlja i također shema mreže. Signalizacija i mjerenje određenih elemenata mreže mogu biti smješteni na komandnoj ploči ili su sastavni dio dispečerskog stola. Registracija podataka redovito je automatska i sastoji se od 1 ili 2 printera i magnetofonskih aparata, a može biti u sastavu dispečerskog stola ili smještena posebno. Dispečerski stol — radno mjesto dispečera — redovito je predviđen za dvojicu: dispečera i njegovog pomoćnika. UKV-radio i telefonska centrala redovito su u sastavu dispečerskog stola. Preko

tih veza dispečer može uspostaviti kontakt s ekipama na terenu i povezati se sa susjednim distributivnim područjima, pojnim tačkama iz prenosne mreže itd. Dispečerski centar poduzeća »Elektra-Zagreb« pokazuje sl. 69.

M. Balling

LIT.: C. F. Wagner, R. D. Evans, Symmetrical components, New York 1933. — W. Mangoldt, Die wirtschaftliche Ausgestaltung städtischer Drehstromnetze, Berlin 1933. — S. B. Cray, Power system stability, 2 vol, New York 1945. — D. Matanović, Električni proračun vodova i mreža, Zagreb 1947. — M. Vidmar, Problemi prenošenja električne energije, Ljubljana 1947. — E. W. Kimbark, Power system stability, 3 vol., New York 1948. — R. Pottier, U. Harlieb, Neue Grundsätze für die Errichtung elektrischer Verteilungsnetze, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1948. — A. J. Rjabkov, Električne mreže i dalekovodi (prijevod s ruskoga), Zagreb 1949. — G. Kron, Tensor analysis of networks, New York 1949. — L. Musil, Praktische Energiewirtschaftslehre, Wien 1949. — E. Clarke, Circuit analysis of a-c power systems, 2 vol., New York 1950. — W. C. Johnson, Transmission lines and networks, New York 1950. — Z. Falu, Mreže za prenos energije (prijevod s francuskog), Beograd 1951. — J. R. Mortlock, M. W. Humphrey Davies, Power system analysis, London 1952. — L. F. Woodruff, Principi prijenosa električne energije (prijevod s engleskog), Zagreb 1954. — B. G. A. Skrotzki, Electric transmission and distribution, New York 1954. — Massachusetts Institute of Technology, Electric circuits, New York 1955. — D. Stevenson, Elements of power system analysis, New York 1955. — L. K. Kirchmayer, Economic operation of power systems, New York 1958. — B. I. Aizenberg, H. B. Волович, М. Н. Ивченко, Н. Д. Каминский, В. В. Кезевич, Н. И. Медведевский, Городские электрические сети, Москва 1958. — L. K. Kirchmayer, Economic control of interconnected systems, New York 1959. — A. Kaminski, Stabilität des elektrischen Verbundbetriebs, Berlin 1959. — M. Wolf, Enzyklopädie der Energiewirtschaft, Berlin 1959. — S. T. Despotović, Osnovi analize elektroenergetskih sistema, Beograd 1962. — H. Edelmann, Berechnung elektrischer Verbundnetze, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1963. — Westinghouse Electric Corporation, Prenos i distribucija električne energije, priručnik (prijevod s engleskog), Beograd 1964. — H. Waddicor, The principles of electric power transmission, London 1964. — С. Я. Свирен, Электрические станции, подстанции и сети, Киев 1964. — W. W. Lewis, The protection of transmission systems against lightning, New York 1965. — S. T. Despotović, Matematički modeli u analizi elektroenergetskih sistema, Beograd 1965. — H. Ruff, Planung und Bau von Stromversorgungsnetzen für Städte, Frankfurt/Main 1966. — M. Dokmanić, Elektroenergetske mreže, Zagreb 1966. — В. А. Боровиков, В. К. Косарев, П. А. Ходот, Электрические сети и системы, Ленинград 1968. — G. Lorenz, Starkstromleitungen, Leitungsnetze und deren Berechnung, Berlin 1968. — H. A. Мельников, Электрические сети и системы, Москва 1969. — A. E. Knowlton, Standard handbook for electrical engineers, New York 1969. — Siemens-Schuckert-Werke, Planung und Bau von Ortsnetzen, Karlsruhe, s. a. — M. Neidle, Electrical installation technology, London 1970.

B. Stefanini M. Balling

ELEKTRIČNI KRUGOVI (mreže, sklopovi). Skup električnih naprava koje su preko svojih priključnica s pomoću električnih vodiča među sobom spojene naziva se u elektrotehnici električnom mrežom ili sklopom. Električna mreža u kojoj su električne naprave tako spojene da tvore samo jedan zatvoren put struje zove se električni krug (kolo).

Uzimajući konkretnu (realnu) mrežu stvarnih električnih naprava kao uzor, često se u elektrotehničkoj literaturi upotrebljava pojam idealne mreže, mreže koja se sastoji od zamišljenih elektrotehničkih elemenata s idealnim, jednoznačno definiranim električnim svojstvima. Idealne mreže ne mogu se ostvariti. Moderna teorija električnih mreža služi se još apstraktnijim pojmom električne mreže. U njoj je električna mreža orijentirani linearni graf (v. str. 51) čijim su granama pridružene po dvije realne funkcije realne promjenljive t (vremena) — funkcija struje $i(t)$ i funkcija napona $u(t)$ — tako da su zadovoljeni prvi i drugi Kirchhoffov zakon (zakon struje ili čvorišta i zakon napona ili petlje), a odnosi između funkcija $u(t)$ i $i(t)$ pridruženih istoj grani posebno su definirani. U shemama električnih mreža navedeni se odnosi označuju posebnim simbolima, koji predstavljaju elemente mreže.

Prvi i drugi Kirchhoffov zakon i relacije između funkcija $u(t)$ i $i(t)$ jesu postulati teorije električnih mreža.

Teorija električnih mreža aksiomatski je fundirana teorija kojoj su objekti naprijed definirane apstraktna mreže. *Analiza mreže* proučava svojstva električne mreže, a *sinetza mreže* određuje elemente i konfiguraciju mreže na osnovi zadanog analitičkog izraza koji karakterizira traženu mrežu.

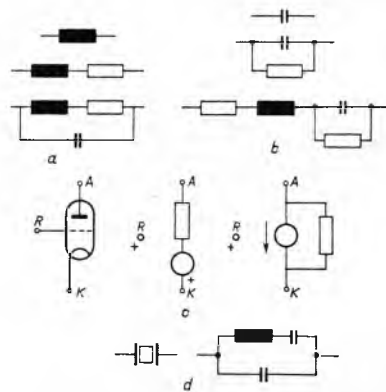
Primjenom teorije mreža mogu se proučavati električna svojstva konkretnih, stvarnih (fizičkih) električnih mreža ili naprava (analiza konkretnih mreža) ili projektirati električne naprave s unaprijed propisanim svojstvima (sinetza konkretnih mreža).

Da bi se odnosi među električnim veličinama neke električne naprave ili konkretne mreže mogli proučavati na temelju apstraktna mreže, potrebno je najprije zadanom električnom objektu pridružiti pogodnu apstraktnu mrežu tako da su odnosi promatranih električnih veličina jednaki odnosima tih veličina u promatranom objektu. Tako pridružena apstraktna mreža zove se *nadomjesna (ekvivalentna) mreža ili shema* zadane konkretne mreže. Nadomjesna mreža predstavlja za određeno područje rada matematički model promatrane konkretne mreže. Teorijom mreže definirano je toliko

apstraktnih elemenata koliko je potrebno da se modelom prikažu sva bitna električna svojstva konkretnih naprava.

Idealnim mrežama ne mogu se obuhvatiti sva električna svojstva nekog električnog uređaja. Tako su npr. odnosi između napona i struje u realnim mrežama samo približno linearni, što se mrežama s elementima koji su definirani kao linearni ne može prikazati. Da električni model nekog uređaja ne bi postao nepregledan, često se izostavljaju elementi koji za prikaz električnih prilika pod specifičnim uvjetima rada ne utječu bitno na tražene vrijednosti. Tako pojednostavnjena nadomjesna mreža vrijedi samo ograničeno i odgovara promatranom uređaju samo u određenim uvjetima rada. Struktura mreže koja treba da služi kao matematički model nekog uređaja ovisi prema tome o uvjetima rada dotičnog uređaja i o mjeri do koje se žele obuhvatiti promatrani električni efekti.

Na sl. 1 prikazane su, kao primjeri, nadomjesne sheme induktivnog svitka, kondenzatora, triode i piezoelektričnog kristala.



Sl. 1. Nadomjesne sheme induktivnog svitka (a) i kondenzatora (b); simboli i nadomjesne sheme triode (c) i piezoelektričnog kristala (d)

Za induktivni svitak i za kondenzator dane su po tri nadomjesne sheme; koja će od ovih triju nadomjesnih shema zadovoljavati, ovisi o pogonskim uvjetima i kvalitetu dotične naprave. Trioda je prikazana dvjema ekvivalentnim nadomjesnim shemama, a izbor sheme će ovdje ovisiti o metodi analize.

Teorija mreža ne obuhvaća metode kojima se danom električnom uređaju pridružuje prikladan model, nego analizira, kao što je već rečeno, odabrani model mreže ili određuje konfiguraciju mreže iz određenih zadanih relacija među električnim veličinama pridruženima mreži.

Linearni graf mreže. Prikaz električne mreže u kojemu nisu unijeti elementi mreže, nego su unijeta samo njezina čvorišta i grane, predstavlja *linearni graf mreže*. Linearni graf mreže prikazuje samo njezin geometrijski aspekt, tj. međusobnu povezanost grana i čvorišta mreže. Podaci električne mreže koji su sadržani u njezinom grafu imaju važnu ulogu u analizi i sinetzi mreža. Tako se na osnovi linearnog grafa mreže može odrediti broj nezavisnih struja ili napona potrebnih za određivanje svih ostalih struja i napona u mreži.

Topološka svojstva tvorevine kakvu predstavlja električna mreža proučava *teorija linearnih grafova*. U nastavku su navedene neke osnovne definicije iz te teorije.

Linearni graf (konačni) geometrijska je tvorevina (sl. 2) što je tvori konačan skup tačaka i segmenata linija koje spajaju različite ili identične parove tačaka tog skupa. Tačke su *čvorišta*, a segmenti linija, *grane* grafa. Broj grana koji veže par čvorišta može biti bilo koji, uključivši ovamo i nulu. Graf je *planaran* ako se može prikazati u ravnini tako da se mimo čvorišta nijedna grana ne ukrštava s drugom; ako to nije moguće, graf je *neplanaran* (sl. 3). Najjednostavniji graf tvori jedno čvorište. Čvorište koje nije povezano nijednom granom zove se *izolirano čvorište*. Grana kojoj oba kraja leže u istom čvorištu naziva se *singularna grana*, a grana koja povezuje par različitih čvorišta, *nesingularna grana*. Čvorište i grana koja spaja to čvorište *incidentni* su jedan s drugim. Broj koji kaže koliko je grana incidentno s nekim čvorištem zove se *red* tog čvorišta. Singularna grana povećava red čvorišta s kojim je incidentna za dva.

Dvije su grane *u seriji* ako imaju tačno jedno zajedničko čvorište koje nije incidentno ni s jednom daljom granom. Čvorište s kojim su obje grane incidentne prema tome je drugog reda. Dvije grane *su paralelne* ako su incidentne s istim parom čvorišta.