Analiza gubitaka u VN u prijenosnoj mreži

Mikulić, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:760390

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Sveučilišni studij

ANALIZA GUBITAKA U VISOKONAPONSKOJ PRIJENOSNOJ MREŽI

Diplomski rad

Filip Mikulić

Osijek, 2016.

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

ETFOS ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek,

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Ime i prezime studenta:	Filip Mikulić
Studij, smjer:	Diplomski studij, Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	0165048371, 2014.
Mentor:	prof.dr.sc. Zoran Baus
Sumentor:	
Predsjednik Povjerenstva:	prof.dr.sc.Srete Nikolovski
Član Povjerenstva:	
Naslov diplomskog rada:	Analiza gubitaka u visokonaponskoj prijenosnoj mreži
Primarna znanstvena grana rada:	**Elektrotehnika**
Sekundarna znanstvena grana (ili polje) rada:	**Elektroenergetika**
Zadatak diplomskog rada:	Prikazati gubitke u VN prijenosnoj mreži te podjele istih. Navesti metode proračuna gubitaka, te konkretan primjer izračuna iz prakse.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu:(2) Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka:(2) Jasnoća pismenog izražavanja:(2) Razina samostalnosti:Potpuno samostalno

Potpis sumentora:	Potpis mentora:

Dostaviti:

Studentska služba

U Osijeku, godine Potpis predsjednika Odbora:

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek,

Ime i prezime studenta:	Filip Mikulić
Studij :	Diplomski studij
Mat. br. studenta, godina upisa:	0165048371, 2014.

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**:**

Analiza gubitaka u visokonaponskoj prijenosnoj mreži

izrađen pod vodstvom mentora

prof.dr.sc. Zoran Baus

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD..... 1
2. GUBICI U ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA..... 2
2.1 Općenito o vodovima i podjele gubitaka u elektroenergetskim mrežama..... 2
2.1.1 Općenito o vodovima..... 2
2.1.2 Podjele gubitaka u elektroenergetskim mrežama 3
2.2 Vrste gubitaka u energetskim mrežama 5
2.2.1 Gubici djelatne i jalove snage..... 5
2.2.2 Korona..... 7
2.2.3 Skin efekt..... 9
3. IZRAČUN GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE 10
3.1.1 Električni gubici u vodu i indeks gubitaka voda..... 10
3.1.2 Izračun i analize gubitaka u vodu 11
3.2 Izračun gubitaka u vodu sa strujnom krivuljom opterećenja..... 13
3.2.1 RMS strujna metoda 13
3.2.2 Metoda faktora gubitaka 14
3.3 Izračun gubitaka u vodu krivuljama opterećenja..... 14
3.3.1 Izračun gubitaka u vodu s obzirom na faktor snage 14
3.3.2 Tröger metoda maksimalnog faktora opterećenja 15
3.3.3 Cweink metoda ekvivalentne krivulje opterećenja..... 16
3.4 Izračun gubitaka voda nakon kompenzacije jalove energije 18
3.4.1 Izračun parametara krivulje opterećenja nakon kompenzacije jalove energije 18
3.4.2 Izračun smanjenja gubitaka jalovom kompenzacijom..... 21
3.4.3 Izračun krivulja godišnjih gubitaka električne energije za planiranje i dizajniranje energetske mreže..... 23
3.5 Teorijski izračun gubitaka električne energije u elektroenergetskoj mrežnoj jedinici 27
3.5.1 Klasifikacija gubitaka električne energije 27

3.5.2 Izračun gubitaka elektroenergetskih nadzemnih vodova 28
3.5.3 Izračun gubitaka uzrokovanih koronom pogonskog voda 31
3.5.4 Izračun gubitaka toplinskog otpora nadzemnih vodova 32
4. IZRAČUN GUBITAKA U VISOKONAPONSKIM MREŽAMA 35
4.1 Metoda procjene stanja 35
4.1.1 Procjena stanja bazirana na SCADA sustavu 35
4.1.2 Izračun gubitaka kombiniranjem procjene stanja sa excelom 36
4.1.3 Metoda bazirana na tipičnom danu mjerenja stvarnih opterećenja i procjene stanja 37
4.1.4 Sveobuhvatna metoda analize gubitaka baziranih na realnom vremenu podataka sustava 38
4.2 Ekvivalentna metoda čvorova snaga za izračun gubitaka u visokonaponskim mrežama 40
4.2.1 Dvodimenzionalni red za izračun gubitaka u energetskim mrežama 40
4.2.2 Izračun gubitaka električne energije u mreži 41
4.3 Izračun gubitaka u prijenosnim mrežama baziran na tri načina 42
5. PRIMJERI IZRAČUNA I ANALIZE 44
5.1 Izračun gubitaka 110 kV dalekovoda prema dvije metode 44
5.2 Primjer izračuna gubitaka prijenosne mreže jednog tipičnog dana 46
5.3 Analiza 400 kV dalekovoda Ernestinovo-Žerjavinec 52
ZAKLJUČAK 55
LITERATURA 56
SAŽETAK 57
ŽIVOTOPIS 58

1. UVOD

Tema diplomskog rada je „Analiza gubitaka u visokonaponskoj prijenosnoj mreži“. U radu je obrađena problematika gubitaka te metode za izračun gubitaka u vodovima.

U prvom dijelu diplomskog rada dane su podjele gubitaka i vrste gubitaka koji se pojavljuju u prijenosnim mrežama. Prikazane su vrste tehničkih gubitaka, te razlika između gubitaka ovisnih o naponu i gubitaka ovisnih o struji. Također je navedeno kakvi su to ne tehnički gubici i o čemu ovise. Navedeni su gubici koji se pojavljuju na dalekovodima. Objašnjeni su gubici djelatne i jalove snage te su dane vrste gubitaka djelatne snage. Također je opisana problematika korone te skin efekta u prijenosnim vodovima.

U drugom dijelu objašnjen je pojam indeks gubitaka. Opisan je pojam analize gubitaka ali i njezina važnost. Dan je izračun gubitaka u vodu s obzirom na faktor snage. Tröger metoda za izračun gubitaka u vodu s faktorom snage u trenutku maksimalnog opterećenja je jedna od onih koju su hvalili stručnjaci te je i ona opisana zajedno sa relacijama za izračun. Pod istom metodom je navedena i formula za izračunavanje faktora gubitaka prividne snage. U Cweink metodi je prikazano kako je faktor gubitaka F izračunat sa indeksom opterećenja f te je dobivena formula koja će se u daljnjim izračunima koristiti za izračunavanje gubitaka električne energije.

U nastavku istog poglavlja dani su izračuni gubitaka voda nakon kompenzacije jalove energije te objašnjena definicija stupnja jalove kompenzacije. U radu je objašnjen način dobivanja relacija za izračun faktora gubitaka godišnje ekvivalentne krivulje opterećenja za 110 kV-tne i 220 kV-tne dalekovode. Prikazane su relacije za izračun gubitaka u nadzemnim vodovima s obzirom na temperaturni porast izazvan strujom opterećenja.

Treći dio diplomskog rada je baziran na metodama za izračun gubitaka u visokonaponskim prijenosnim mrežama. Jedna od metoda bazirana je na procjeni stanja. U radu je opisano što je procjena stanja i za što se koristi. Također i na koji način brza procjena stanja može realizirati izračun gubitaka u realnom vremenu. Navedene su prednosti i nedostaci metode izbora snage te pojam koeficijenta izlazne raspodjele opterećenja te kako se isti računa. Također je u nastavku opisano na koji način se računaju gubici električne energije u mreži ako je razdoblje izračuna jedan dan.

U četvrtom poglavlju su navedeni primjeri za izračun gubitaka električne energije u visokonaponskim dalekovodima. Dan je primjer izračuna gubitaka električne energije jedne prijenosne mreže tipičnog dana. Također je i analiziran 400 kV dalekovod Ernestinovo-Žerjavinec te su prikazana opterećenja i gubici na mjesečnoj bazi.

2. GUBICI U ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA

2.1 Općenito o vodovima i podjele gubitaka u elektroenergetskim mrežama

2.1.1 Općenito o vodovima

Konstante voda su:

- djelatni otpor $R\,[\Omega]$,
- induktivitet $L\,[H]$,
- kapacitet $C\,[F]$,
- vodljivost $G\,[S]$

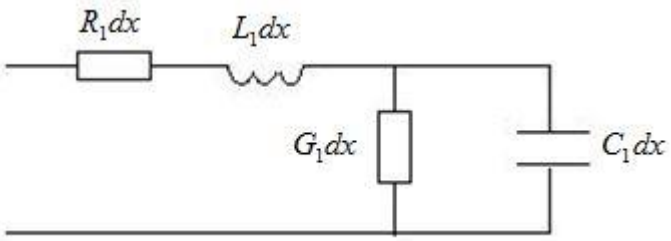
Konstante nadzemnih elektroenergetskih vodova ovise o:

- svojstvima materijala (specifični otpor vodiča, vrsta materijala vodiča, vrsta izolacije)
- geometrijskim svojstvima voda (dimenzije vodiča, međusobna udaljenost i raspored vodiča)
- atmosferskim prilikama (temperatura, kiša itd.)

Vodovi se općenito razlikuju po duljini, pa se zbog toga parametri voda daju po jedinici duljine, uobičajeno po kilometru duljine voda:

- jedinični djelatni otpor $R_1\,[\Omega/km]$,
- jedinični induktivitet $L_1\,[H/km]$,
- jedinični kapacitet $C_1\,[F/km]$,
- jedinična vodljivost $G_1\,[S/km]$

Elektroenergetski vodovi su elementi sa raspodjeljenim konstantama.



Sl.2.1 Jednofazni prikaz elementarne duljine voda dx

Prema položaju u shemi voda:

- otpor i induktivitet su uzdužni parametri, a
- vodljivost i kapacitet su poprečni parametri voda

Prema tome da li u njima nastaju gubici ili ne:

- otpor i vodljivost su parametri u kojima nastaju gubici,
- induktivitet i kapacitet su parametri bez gubitaka.

Vodljivost voda, kao jedna od konstanti vodova, nastaje zbog nesavršenosti izolacije. Kod nadzemnih vodova izolacija je zrak. Struje teku kroz izolaciju između vodiča međusobno i između vodiča i zemlje. Uslijed protjecanja tih struja u izolaciji nastaju gubici snage i gubici energije. Vodljivost je definirana kao:

$$G_1 = \frac{\Delta P}{U^2} \left(S / km\right) \tag{2-1}$$

gdje je:

- ΔP – gubici snage sva tri fazna vodiča (MW/km);
- U – linijski napon (kV)

Parametri voda mogu imati različite vrijednosti. Ponekad neki od njih mogu imati zanemarivu vrijednost u odnosu na vrijednost drugih parametara. Zato se u električnim proračunima često ne uzimaju sva četiri parametra:

- Pri električnim proračunima nadzemnih vodova srednjih napona (10, 20 i 35 kV) uzima se u obzir otpor i induktivitet,
- Pri električnom proračunu vodova napona 110 kV i višeg uzima se u obzir otpor, induktivitet i kapacitet, a u nekim proračunima i vodljivost,
- Kod vodova najviših napona (400 kV i više) uzimaju se u obzir sva četiri parametra,
- Kod vodova za prijenos elektične energije se u određenim slučajevima, npr.pri proračunima električnih prilika u dugim vodovima, zanemaruju otpor i vodljivost, te se uzimaju u obzir samo induktivitet i kapacitet.

2.1.2 Podjele gubitaka u elektroenergetskim mrežama

Sa stajališta operatora mreže, gubici su neizbježan trošak prilikom prijenosa električne energije koji uzrokuje dodatno opterećenje elektroenergetskog sustava. Kako bi se olakšala analiza i ispravno razmotrili različiti uzroci fenomena gubitaka moguće ih je podijeliti u dvije skupine:

- tehničke gubitke,
- ne tehničke gubitke

Tehnički gubici u komponentama elektroenergetskog sustava mogu se podijeliti na:

- gubitke ovisne o naponu,
- gubitke ovisne o struji,

Gubici ovisni o naponu, odnosno stalni gubici, posljedica su održavanja elektroenergetskog sustava u stanju stalne pogonske pripravnosti za opskrbu kupaca električnom energijom. Ovdje pripadaju gubici u jezgrama transformatora, dielektrični gubici voda i kondenzatorskih baterija. Gubici ovisni o struji posljedica su protjecanja struje kroz komponente elektroenergetskog sustava i ovisni su o stupnju korištenja mreže, tj. o količini prenesene energije, odnosno ovisni su o kvadratu struje.

Ne tehničke gubitke definiramo kao razliku ukupnih gubitaka i tehničkih gubitaka električne energije. Ne tehnički gubici mogu nastati iz raznih razloga (neodržavanje, neispravni ili neodgovarajući mjerni uređaji, nesimetrično opterećenje...

Gubici električne energije u prijenosnim mrežama mogu se podijeliti prema:

a) mjestu njihovog nastanaka (elementi prijenosne mreže) i

b) ovisnosti o opterećenju (gubici neovisni o opterećenju - stalni gubici, gubici ovisni o opterećenju - promjenljivi gubici)

Gubici u prijenosnim mrežama manji su od onih u distribucijskim.

Električni vodovi u pogonskom stanju su permanentni izvori topline u skladu s Jouleovim zakonom. Prije puštanja u pogon oni imaju temperaturu jednaku temperaturi svoga okoliša. Nakon puštanja u pogon, temperatura vodiča se povećava i počinje prijenos topline na okoliš. Prema zakonu termodinamike, prijenos je to intenzivniji što je temperaturna razlika između vodiča i okoliša veća. To prijelazno stanje traje sve dok se ne postigne tako visoka temperatura vodiča u vodu da novoproizvedena toplina postane jednaka toplini koja se prenese na okoliš. Ta ravnoteža se ne mijenja dok se ne promijeni struja u vodu, pa govorimo o radnoj (ili pogonskoj) temperaturi voda.

Gubici na dalekovodima uključuju:

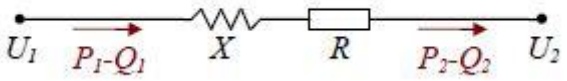
- Gubitke u vodičima,
- Gubici isijavanja/zračenja,
- Gubici zagrijavanja,
- Gubici na spojevima,
- Korona

Jedna od mjera za smanjenje gubitaka vodova je da se ili smanje duljine vodova ili da se poveća presjek voda. Gubici u vodovima ovise o frekvenciji tj. o fenomenu kojeg nazivamo skin efekt, koji će poslije biti detaljnije objašnjen. Znamo da razlika potencijala između dva vodiča dalekovoda uzrokuje dielektrično zagrijavanje, te da se s povećanjem frekvencije povećavaju i toplinski gubici u vodovima. Gubici na spojevima se javljaju kada su dva dijela dalekovoda spojena na jednom mjestu. Također se javljaju kada se na spojevima spajaju dva različita materijala vodiča. Kada je vod u pogonu, na spojevima dolazi do zagrijavanja te i određenih gubitaka.

2.2 Vrste gubitaka u energetskim mrežama

2.2.1 Gubici djelatne i jalove snage

Poznato je da kod prijenosa električne energije od izvora do potrošača putem dalekovoda (mreže) i transformatorskih stanica, mora u svakom trenutku postojati ravnoteža između snage generatora i snage potrošača. Pri tome na strani potrošnje moraju biti uključeni i gubici snage kod prijenosa. Ukupni gubici djelatne i jalove snage kod prijenosa se sastoje iz gubitaka u pojedinim dijelovima voda (mreže). Ako opterećenja izražavamo u snagama, izračun dalekovoda (mreže) se izvodi za zadanu nadomjesnu shemu prema pojedinim dijelovima. Kao jedan dio uzet ćemo onaj uzduž kojega struja ne mijenja svoju veličinu (primjerice dio sheme između dva opterećenja ili dio sheme između dvije vodljivosti). Uzet ćemo za primjer dio s konstantnom strujom *I* kod induktivnog opterećenja.



Slika 2.2 Nadomjesna shema dijela voda

Vrijedi da je :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} \tag{2-2}$$

Gubici djelatne i jalove snage biti će:

$$\Delta P = 3 \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} \right)^2 \cdot R \tag{2-3}$$

$$\Delta Q = 3 \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} \right)^2 \cdot X \tag{2-4}$$

Za prividnu snagu vrijedi da je: $S^2 = P^2 + Q^2$

Kada se prividna snaga uvrsti u formule za gubitke djelatne i jalove snage dobivamo:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R \tag{2-5}$$

$$\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot X \tag{2-6}$$

Četiri vrste gubitaka djelatne snage su uzrokovane u vodu:

1.Gubici toplinske otpornosti $\Delta P_1\,(W)$

U izravnoj je proporciji s kvadratom struje, koja je:

$$\Delta P_1 = I^2 R \tag{2-7}$$

gdje je:

- I – struja koja prolazi jezgrom voda (A),
- R – zbroj otpora obje jezgre voda (Ω).

2. Gubici propuštanja $\Delta P_2\,(W)$

U izravnoj je proporciji s kvadratom napona, odnosno:

$$\Delta P_2 = U^2 G \tag{2-8}$$

$$G = \frac{2\pi l r}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \tag{2-9}$$

gdje je:

- U – napon između jezgre voda (V),
- G – propuštanje dielektrične vodljivosti (1/Ω),
- l – duljina voda (m),
- r_1 – opseg jezgre voda (cm),
- r_2 – unutarnji opseg voda (cm)

3.Gubici dielektričnog magnetiziranja $\Delta P_3\,(W)$

U izravnoj je proporciji s kvadratom struje i frekvencijom, odnosno:

$$\Delta P_3 = I^2 \omega L \tan\delta \tag{2-10}$$

$$L = \frac{l\mu}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \tag{2-11}$$

gdje je:

- ω – izmjenična frekvencija (1/s),
- L – induktivitet voda (Wb/A),
- μ – magnetska provodljivost (Ωs/m)

4. Gubici dielektrične polarizacije $\Delta P_4 (W)$

U izravnoj je proporciji s kvadratom napona i frekvencije , odnosno

$$\Delta P_4 = U^2 \omega C \tan \delta \tag{2-12}$$

$$C = \varepsilon \frac{2\pi l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \tag{2-13}$$

gdje je:

- C – kapacitet voda (F),
- ε – dielektrična konstanta voda (F/m).

Navedene četiri vrste gubitaka djelatne snage predstavljaju osnovne vrste gubitaka djelatne snage u elektroenergetskom sustavu. Osim toga, gubici izazvani koronom mogu se pojaviti u visokonaponskim vodovima. Ovo je posebna vrsta gubitaka djelatne snage zbog ionizacije dielektričnih čestica izvan dosega kada je intenzitet električnog polja previsok na površini vodiča. To se odnosi na intenzitet površine u polju od vodiča i gustoće zraka.

2.2.2 Korona

Zrak, kao izolacija nadzemnih vodova, uvijek je djelomično ioniziran. Pod djelovanjem električnog polja, ioni se ubrzano kreću i sudaraju se sa neioniziranim česticama, ali pri tom sudaru ne uspjevaju da stvore nove ionizirane čestice. Ukoliko je jačina električnog polja veća i gustoća zraka manja, brzina će a time i kinetička energija ioniziranih čestića biti veća. Pri nekoj određenoj brzini ioni uspjevaju da pri sudaru stvaraju nove ione. Zrak ubrzo postaje vodljiv. Pri temperaturi od $+25^\circ C$ i pritisku od 760 mm Hg intezivno ioniziranje zraka oko vodiča nastaje kod jačine električnog polja od 30 kV/cm. S obzirom da je između vodiča nadzemnih vodova razmak velik, neće doći do proboja između vodiča. Umjesto proboja pojavit će se tinjavo pražnjenje (izbijanje) oko vodiča. Ta pojava, kao što je već rečeno, naziva se korona. Jačina

električnog polja je najveća na površini vodiča, pa je i izbijanje u zraku najveće oko samog vodiča. Na većoj udaljenosti oko vodiča električno polje je slabije, zbog čega zrak uglavnom zadržava izolacijsko svojstvo. Pri pojavi korone oko vodiča se stvara vijenac ljubičastog svjetla i tako je ime i dobijeno.

Prilikom nastanka korone javlja se i karakteristično pucketanje i osjeća se miris ozona. Ioniziranje zraka se vrši na račun električne energije u vodu, zbog čega je korona popraćena gubicima snage i energije. Kod sinusoidalne promjene napona korona postoji samo dotle dok je trenutna vrijednost napona bliska maksimalnoj vrijednosti, tako da se tinjava pražnjenja stalno pale i gase. Ozon stvoren pojavom korone nagriza materijal vodiča. Sve su to štetne posljedice korone. Korona je zbog toga vrlo nepoželjna pojava na nadzemnim vodovima. Napon pri kojem se javlja korona naziva se kritični napon. Ako je pogonski napon manji od kritičnog napona, korona se ne može pojaviti. Ukolikoje pogonski napon veći od kritičnog napona korone, pojavit će se korona.

Kritični napon korone izračunavamo po empirijskoj formuli:

$$U_{kr} = U_{pr} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot m_p \cdot m_v \cdot \delta \cdot r \cdot \ln\left(\frac{D}{r}\right) [kV] \tag{2-14}$$

$$\delta = \frac{p}{1{,}013} \cdot \frac{273 + 25}{273 + \upsilon\left(^{\circ}C\right)} \tag{2-15}$$

gdje je:

- δ – koeficijent koji uzima u obzir odstupanje temperature i barometarskog tlaka odnosno promjenu relativne gustoće zraka;
- m_p – faktor hrapavosti vodiča/ uzima u obzir stanje površine vodica i njegovu izvedbu;
- m_v – koeficijent koji uzima u obzir meteorološke uvjete
- D – razmak između vodiča (cm);
- r – polumjer vodiča (cm)

Kod izračuna koeficijenta m_p za okrugle vodiče, odnosno vodiče s jednom žicom uzimamo vrijednosti od 0,93 do 0,98. Za užad od 7 žica vrijednost istog koeficijenta će biti od 0,83 do 0,87, te za užad sa više od 7 žica vrijednost će biti od 0,80 do 0,83. Kod izračuna koeficijenta m_v

kada je lijepo (suho i vedro) vrijeme uzimamo da nam je koeficijent m_v=1. Koeficijent će biti nešto manji, m_v=0,8 za ružno vrijeme (magla, kiša,inje,led,snijeg)

Iz izraza slijedi da do povećanja kritičnog napona korone dolazi povećanjem razmaka između vodiča vodiča D, kao i povećanjem polumjera r. Povećanje razmaka između vodiča nije ekonomično, jer poskupljuje izgradnju dalekovoda. Povećanje polumjera vodiča je mnogo efikasnije i ekonomičnije.

Kod visokonaponskih dalekovoda su se počeli primjenjivati šuplji vodiči radi smanjenja korone.

2.2.3 Skin efekt

Kada kroz vodič protječe izmjenična struja javlja se nejednolika raspodjela struje. Gustoća struje je (A/mm^2) u tom slučaju najmanja u sredini vodiča, a najveća na površini vodiča. Ta pojava se naziva skin efekt. To znači da pri snažnom skin efektu struja teče uglavnom ispod same vanjske površine vodiča, a gotovo nikad u sredini vodiča. Utjecaj skin efekta je utoliko veći ukoliko je:

- veći presjek vodiča,
- veća permeabilnost materijala vodiča,
- veća frekvencija struje,
- veći specifični otpor materijala vodiča,

Utjecaj skin efekta na povećanje otpora pri frekvenciji od 50 Hz je neznatan kod vodiča presjeka $150\ mm^2$. Naime, kod vodiča presjeka od $150\ mm^2$ povećanje otpora uslijed skin efekta iznosi od 0,1 do 0,5 %. Međutim, kod vodiča većih presjeka utjecaj skin efekta na povećanje otpora je znatan i ne smije se zanemariti. Tako, kod vodiča presjeka $300\ mm^2$ povećanje otpora uslijed skin efekta iznosi do 2%.

3. IZRAČUN GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Gubitak električne energije ΔA (kW · h) je integral gubitka djelatne snage u vremenskom periodu.

$$\Delta A = \int_0^T \Delta P(t)dt \times 10^{-3} \tag{3-1}$$

Za gubitke toplinske otpornosti prema prethodnoj formuli pišemo:

$$\Delta A = \int_0^T I^2(t)\,R(t)dt \times 10^{-3} \tag{3-2}$$

U razdoblju *T*, struja opterećenja i otpora vodiča može varirati, tako da je više komplicirano izračunavanje gubitaka električne energije od gubitaka djelatne snage. Kada je razdoblje za izračun dugačko, teško je koristiti metodu *point by point* kvadratom akumulacije za izračun gubitaka električne energije. Ako se relevantnim parametrima strujne krivulje opterećenja *I(t)* ili djelatnom krivuljom opterećenja *P(t)* koriste za izračunavanje gubitaka električne energije, teško je dobiti zadovoljavajuće točne rezultate izračuna. To je problem koji bi trebao biti usmjeren kod proučavanja teorije i izračuna gubitaka električne energije pojedinim metodama.

3.1.1 Električni gubici u vodu i indeks gubitaka voda

Ukupnu količinu izgubljene energije u prijenosnim mrežama, elektroenergetskim postrojenjima i distribucijskim mrežama u određenom razdoblju (dan, mjesec, kvartal ili godina) definiramo kao gubitke električne energije u vodovima ili gubici voda. Iako dio gubitaka električne energije voda mogu biti određeni teorijskim izračunom ili pak mogu biti izmjereni, ukupni gubici električne energije se ne mogu točno izmjeriti. Dakle, gubici električne energije voda obično se izračunavaju oduzimanjem ukupne "predane količine snage" od ukupnog "električnog napajanja".

Formula za izračunavanje opskrbe električnom energijom je:

$$A_{e.s} = A_{e.p} - A_{e.c} - A_{out} + A_{in} \tag{3-3}$$

gdje je:

- $A_{e.s}$ – opskrba električnom energijom elektroenergetskim mrežama,
- $A_{e.p}$ – proizvodnja električne energije iz elektrana na lokalnom području,
- $A_{e.c}$ – potrošnja električne energije od elektrana,

- A_{out} – izlazna električna energija u druge elektroenergetske mreže,

- A_{in} – izlazna električna energija iz drugih elektroenergetskih mreža.

Postotak gubitaka električne energije voda od opskrbe nazivamo indeks gubitaka voda, a izračunavamo prema sljedećoj formuli:

$$Indeks\ gubitaka\ voda(\%) = \frac{el.opskrba - kol.predane\ snage}{el.opskrba} \times 100\% \tag{3-4}$$

Tijekom vođenja pogona elektroenergetskih mreža, gubici električne energije u vodu dobiveni oduzimanjem ukupne količine predane snage od ukupne opskrbe električnom energijom zovemo statističkim gubicima električne energije voda, i odgovarajući indeks gubitka voda nazivamo statistički indeks gubitka voda. Dio statističkih gubitaka električne energije voda se ne može izbjeći tijekom prijenosa električne energije i određuje se prema uvjetima opterećenja energetske mreže i parametara za napajanje opreme. Takve gubitke električne energije nazivamo tehničkim gubicima električne energije, i mogu biti dobiveni teorijskim izračunom. Dakle, također ih nazivamo teorijskim izračunom gubitaka voda i odgovarajući indeks gubitaka voda nazivamo teorijskim indeksom gubitaka voda.

3.1.2 Izračun i analize gubitaka u vodu

Planiranje elektroenergetske mreže, usporedba programa povezivanja električne mreže, i dizajn trafostanica zahtijevaju teorijski izračun gubitaka voda. Potrebna točnost za izračun gubitaka voda za vrijeme planiranja i projektiranja nije visoka, ali metode proračuna moraju biti jednostavne i praktične. Stoga, prednost se daje tabličnim metodama i metode izračuna krivulja su poželjne. Teorijski izračuni gubitaka voda se mogu koristiti za predviđanje prednosti nekih tehničkih mjera smanjenja gubitka te usporedba u tehnologiji. Relativno sveobuhvatan i detaljan teorijski izračun gubitka voda može odrediti količinu i sastav gubitaka električne energije u vodu, a također može otkriti odnos između tehničkih gubitaka električne energije u vodu i čimbenika kao što su razina pogonskog napona, indeks opterećenja, i prosječni faktor snage kako bi se utvrdile tehničke mjere za smanjenje gubitaka. Rezultati sveobuhvatnog teorijskog izračuna gubitka u vodu mogu također biti u odnosu na statističke gubitke, kako bi procijenili količinu upravljanja gubitaka električne energije i pružaju osnovu za smanjenje gubitaka za upravljanje gubicima električnom energijom.[1,str.5]

Analiza gubitaka s rezultatima teorijskog izračuna gubitka voda je važna za upravljanje gubicima. Tri vrste analize gubitaka voda su potrebne, i to statistička analiza, analiza pokazatelja i ekonomska analiza.

a.) Statistička analiza

- *Analiza gubitaka u regionalnim vodovima*. Gubitke vodova u prijenosu i postrojenjima treba analizirati pomoću napona i samih vodova; gubitke vodova u distribuciji treba analizirati po regijama. Osim toga, gubitke praznog hoda i gubitke opterećenja u regionalnim energetskim mrežama treba analizirati odvojeno za izračunavanje indeks gubitaka voda bez opterećenja i indeks gubitaka opterećenih vodova.
- *Analiza strukture elektroenergetske mreže*. Indeks gubitka voda treba analizirati pomoću napona i opskrbe električne energije, kao i indeks gubitaka voda za različite strukture opskrbe električnom energijom također treba analizirati.
- *Analiza sastava predane količine snage*. Izlaz opskrbe električne energije u okolnu regiju će povećati gubitke voda u lokalnom području, i utjecaj na prijenos opskrbe električne energije treba dodatno analizirati. Postotak količine predane snage bez gubitaka u ukupnoj količini predane snage izravno utječe na vrijednost statističkog indeks gubitka voda i također bi trebali biti analizirani.

Rezultate gore navedene tri vrste statističkih analiza treba usporediti s rezultatima teorijskih izračuna gubitaka voda, kako bi se utvrdilo gdje su gubici voda najveći u prijenosu, elektroenergetskim postrojenjima, i distribucijskom sustavu i odrediti glavne mjere za smanjenje gubitaka.

b) Analiza pokazatelja

Analiza pokazatelja u osnovi uključuje usporedbu pokazatelja indeks gubitaka voda u tekućem razdoblju s onim u proteklom razdoblju, te je usporedba razlike između statističke vrijednosti indeks gubitka voda u tekućem periodu i planirane vrijednosti u proteklom razdoblju. Analiza pokazatelja može slijediti pet razmatranja:

- Povećanje/smanjenje u količini predaje snage, i promjene u kategoriji korištenja električne energije i sastava napona,
- Promjene u načinu rada elektroenergetskog sustava i struktura energetskih mreža,
- Utjecaj na mjere za smanjenje gubitaka i izrade projekta,
- Utjecaj novih velikih potrošača,
- Utjecaj zamjene glavnih sustavnih jedinica

c) Ekonomska analiza

Ekonomska analiza uglavnom uključuje dvije vrste, naime analizu smanjenja gubitaka ostvarenih kompenzacijskom opremom instaliranih u postrojenjima i kompenzacijskih uređaja

raspršenih i instaliranih na vodovima, i analiza prednosti postignuta u procjeni vrha faktora snage za velike potrošače.

3.2 Izračun gubitaka u vodu sa strujnom krivuljom opterećenja

U svrhu praćenja rada, struju opterećenja vodova potrebno je zabilježiti tijekom vremena u elektroenergetskim postrojenjima. Ovo potpoglavlje uvodi dvije osnovne metode za izračunavanje gubitaka vodova sa strujnom krivuljom opterećenja, naime, RMS strujna metoda i metoda faktora gubitaka, te objašnjava odnos između ostalih metoda i ove dvije metode.

3.2.1 RMS strujna metoda

Prema formuli $I_{rms} = \sqrt{\int_0^T I^2(t)dt / T}$, gubici električne energije (kWh) trofazne jedinice su:

$$\Delta A = 3R\int_0^T I^2(t)dt \times 10^{-3} = 3I^2{}_{rms}RT \times 10^{-3} \tag{3-5}$$

Formula (3-5) je osnovna formula izračuna rms strujne metode.

Ako je rms struja reprezentativnog dana korištena u svrhu izračuna gubitaka električne energije za cijeli mjesec, tada izračunati rezultat treba ispraviti prema omjeru prosječne dnevne opskrbe električne energije cijelog mjeseca i opskrbe električnom energijom reprezentativnog dana, odnosno:

$$\Delta A_m = \Delta A_d \left(\frac{A_m / D}{A_d} \right)^2 D \tag{3-6}$$

$$\Delta A_d = 3I^2{}_{rms.d} R \times 24 \times 10^{-3} \tag{3-7}$$

$$I_{rms.d} = \sqrt{\sum_{i=1}^{24} I_i^{\,2} / 24} \tag{3-8}$$

gdje je:

- ΔA_m – mjesečni gubici električne energije (kWh),
- D – kalendarski dani cijelog mjeseca,
- A_m, A_d – električna opskrba cijelog mjeseca i reprezentativnog dana (kWh),
- ΔA_d – gubici električne energije u vodu reprezentativnog dana (kWh),
- $I_{rms.d}$ – rms struja reprezentativnog dana, koja se može izračunati sa 24-satnom strujom istog dana.

3.2.2 Metoda faktora gubitaka

Faktor gubitaka će biti $F = \int_0^T I^2(t)dt/(I^2{}_{\max}T)$, dok će formula gubitaka električne energije ΔA trofazne jedinice glasiti:

$$\Delta A = 3I^2{}_{\max}FRT \times 10^{-3} \tag{3-9}$$

gdje je:

- F – faktor gubitaka,
- T – trajanje mjernog perioda (h).

Formula (3-9) koristi maksimalne struje, te prema tome metodu faktora gubitaka također nazivamo i metodom maksimalne struje. Kako bi se spriječila šteta kod opskrbe ali i opreme zbog preopterećenja, kod rada elektroenergetskog postrojenja treba obratiti više pozornosti na opreznije praćenje struje, pa čak i instalirati posebne instrumente. Dakle, ključ za izračun gubitaka u vodu metodom faktora gubitaka ne leži u dobivanju maksimalne struje, nego u tome kako postići faktor gubitaka. [11, str.73]

3.3 Izračun gubitaka u vodu krivuljama opterećenja

3.3.1 Izračun gubitaka u vodu s obzirom na faktor snage

Ako je faktor snage od prividne snage u vrijeme najvećeg opterećenja $\cos\varphi_{\max}$, tada se izračun gubitaka električne energije s obzirom na faktor snage može analizirati u slučaju kada je najveća prividna snaga uzrokovana maksimalnom djelatnom snagom, te vrijedi:

$$\Delta A = \frac{R}{U_{av}{}^2}\int_0^T \left[P^2(t) + Q^2(t)\right]dt \times 10^{-3} \tag{3-10}$$

pa je:

$$\Delta A = \frac{R}{U_{av}{}^2} S^2{}_{\max}\left(\cos^2\varphi_{\max}F_p + \sin^2\varphi' F_Q\right)T \times 10^{-3} \tag{3-11}$$

$$F_P = \frac{1}{T}\int_0^T P^2(t)dt / P^2{}_{\max} \tag{3-12}$$

$$F_Q = \frac{1}{T}\int_0^T Q^2(t)dt / Q^2{}_{\max} \tag{3-13}$$

gdje je:

- F_P – faktor gubitaka djelatne snage,
- F_Q – faktor gubitaka jalove snaga.

Budući da se maksimalna jalova snaga i maksimalna djelatna snaga ne javljaju uvijek istovremeno, kutevi faktora snage $\varphi_{\max}$ i φ nisu uvijek jednaki. Ako je faktor gubitaka prividne snage F_S, tada je:

$$\Delta A = \frac{R}{U_{av}^2} S_{\max}^2 F_s T \times 10^{-3} \tag{3-14}$$

Prema formuli (3-11),

$$F_S = F_P \cos^2 \varphi_{\max} + F_Q \sin^2 \varphi' \tag{3-15}$$

Kada se $S_{\max}$, $P_{\max}$, i $Q_{\max}$ pojavljuju istovremeno, slijedi da je $F_S = F_{\max}$, i tada se formula (3-15) mjenja u:

$$F_{\max} = F_p \cos^2 \varphi_{\max} + F_Q \sin^2 \varphi' \tag{3-16}$$

3.3.2 Tröger metoda maksimalnog faktora opterećenja

Nijemac Tröger je prvi iznio metodu izračuna gubitaka voda s faktorom snage u trenutku maksimalnog opterećenja. Po njegovom mišljenju promjene jalove snage u dalekovodima se mjenjaju između dvije situacije gdje faktor snage ostaje nepromijenjen i gdje jalova snaga ostaje nepromijenjena. Nakon analize metode izračuna gubitaka voda po takvim situacijama, on je zamislio da se koeficijent C može koristiti za izražavanje stvarne promjene jalove snage. Uzimanjem C=1/2, on izvodi formulu za izračun gubitaka voda s obzirom na promjene jalove snage, odnosno:

$$F_S = \frac{1}{4}\left[(1+2f_p) - \cos^2 \varphi_{\max}(1+2f_p - 3F_P)\right] \tag{3-17}$$

Tröger je također dobio formulu i za izračunavanje faktora gubitaka prividne snage:

$$F_S = 0{,}28 + 0{,}44 f_p + 0{,}28 f_p^2 - \cos^2 \varphi_{\max}(0{,}16 + 0{,}68 f_p - 0{,}84 f_p) \tag{3-18}$$

Tablica izračuna faktora gubitaka $F_s(f_p, \cos\varphi_{\max})$ može se izvršiti na temelju gore navedene formule. Prema analizama, pretpostavka vrijednosti konstante C zapravo umjetno definira odnos između promijenjenih djelatnih opterećenja i jalovih opterećenja. Iako to olakšava izračun, fizički značaj koeficijenta C nije potvrđen. Da bi bili sigurni, prethodna formula izračunava faktor gubitaka sa faktorom snage u vrijeme najvećeg opterećenja, tako da se rezultat

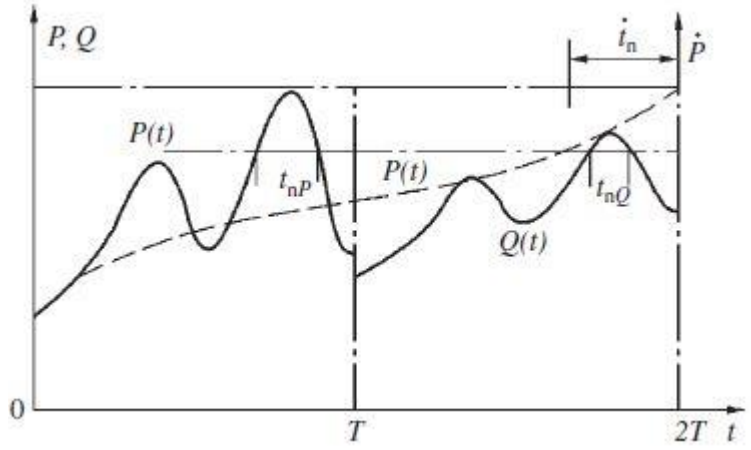
izračuna toka opterećenja može izravno koristiti za izračun gubitaka električne energije. Zbog toga ovu metodu su hvalili mnogi stručnjaci.[1,str.51]

Tab. 3.1. Izračunati faktori gubitaka $F_s(f_p, \cos\varphi_{\max})$

$\frac{\cos\varphi_{\max}}{f_p}$	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	1,0
0,90	0,829	0,844	0,858	0,870	0,880	0,888	0,895	0,899	0,811
0,80	0,677	0,705	0,730	0,751	0,770	0,785	0,796	0,804	0,645
0,70	0,543	0,581	0,615	0,644	0,669	0,689	0,705	0,716	0,501
0,60	0,430	0,475	0,515	0,549	0,578	0,602	0,621	0,634	0,379
0,50	0,335	0,385	0,428	0,466	0,498	0,524	0,544	0,558	0,280
0,40	0,259	0,310	0,355	0,394	0,426	0,453	0,474	0,489	0,203
0,30	0,204	0,253	0,296	0,333	0,365	0,391	0,411	0,426	0,149

3.3.3 Cweink metoda ekvivalentne krivulje opterećenja

Poljak Cweink je iznio novu metodu za izračun gubitaka voda s obzirom na faktor snage. Prema toj metodi, gubici električne energije izazvani djelatnom snagom i jalovom snagom unutar razdoblja izračunavanja *T* se smatraju kako su oni uzrokovani ekvivalentnim opterećenjem unutar *2T*, kao što je prikazano na slici 3.1.



Sl. 3.1. Trajanje krivulje opterećenja

Ekvivalentna opterećenja su jednaka kao ona u krivulji djelatnog opterećenja unutar 0~T, te kao i one u krivulji jalovog opterećenja unutar *T~2T*. Trajanje krivulje opterećenja ekvivalentnih opterećenja je prikazano s isprekidanom crtom na slici 3.1. i izražava se sa $\dot{P}(t)$. Uslijed $\dot{t}_n = t_{nP} + t_{nQ}$, može se dokazati da se ekvivalentna opterećenja mogu pronaći prema sljedećim uvjetima:

$$\Delta A = \frac{R}{U_{av}^2}\left[\int_0^T P^2(t)dt + \int_0^T Q^2(t)dt\right]\times 10^{-3}$$
$$= \frac{R}{U_{av}^2}\int_0^{2T} P^2(t)dt \times 10^{-3} \tag{3-19}$$

Cweink je izračunavao faktor gubitaka F sa indeksom opterećenja f ekvivalentne krivulje opterećenja:

$$F = 0{,}083f + 1{,}036f^2 - 0{,}119f^3 \tag{3-20}$$

Tada je dobivena formula za izračunavanje gubitaka električne energije:

$$\Delta A = \frac{R}{U_{av}^2} P_{\max}^2 F \times 2T \times 10^{-3} \tag{3-21}$$

Prema slici 3.1., kada je minimalna vrijednost ekvivalentne krivulje opterećenja određena jalovom snagom $(P_{\min} = Q_{\min})$ dva parametra f i β trebali bi predstavljati dvije karakteristike, djelatne i jalove krivulje opterećenja. Idealna formula faktora gubitaka uključujući oba parametra f i β može poboljšati ekvivalentnost metode ekvivalentne krivulje opterećenja. S obzirom na stvarne potrebe teorijskog izračuna gubitaka voda s obzirom na faktor snage, izračun krivulje gubitaka voda može se podijeliti u dvije kategorije, naime, dizajn krivulje s faktorom snage za vrijeme maksimalnog opterećenja kao parametara, i krivulja rada s faktorom djelatne snage kao parametara.

Prema praksama izračun gubitaka voda, s obzirom na električna opterećenja prolaskom kroz električnu opremu, $P_{\max} = Q_{\max}$ i $P'_{\min} = P_{\min}$ se mogu dogoditi; ili se komplicirana situacija može dogoditi, gdje se samo djelatna snaga prenosi a jalova snaga se ne prenosi na neko vrijeme, ili gdje se jalova snaga samo prenosi a djelatna snaga ne prenosi. Stoga, metodu ekvivalentne krivulje opterećenja Cweink treba proširiti tako da odgovara različitim situacijama za vrijeme trajanja djelatnog opterećenja , odnosno trajanja jalovog opterećenja.[1,str.54]

Parameter	Type	$\dot{P}_{max} = P_{max}(\cos\varphi_{max} > 0.707)$		$\dot{P}_{max} = Q_{max}(\cos\varphi_{max} < 0.707)$	
$\dot{f}$	For operation	$\dot{f} = \frac{1}{2} f_P (1 + \tan\varphi_{av})$		$\dot{f} = \frac{1}{2} f_Q (1 + 1/\tan\varphi_{av})$	
	For design	$\dot{f} = \frac{1}{2}(f_P + f_Q \tan\varphi_{max})$		$\dot{f} = \frac{1}{2}(f_Q + f_P/\tan\varphi_{max})$	
Parameter	Type	$\dot{P}_{min} = P_{min}$	$\dot{P}_{min} = Q_{min}$	$\dot{P}_{min} = Q_{min}$	$\dot{P}_{min} = P_{min}$
$\dot{\beta}$	For operation	$\dot{\beta} = \beta_P$	$\dot{\beta} = \beta_Q \tan\varphi_{av}/k_f$	$\dot{\beta} = \beta_Q$	$\dot{\beta} = \beta_P k_f/\tan\varphi_{av}$
	For design	$\dot{\beta} = \beta_P$	$\beta = \beta_Q \tan\varphi_{max}$	$\dot{\beta} = \beta_Q$	$\beta = \beta_P/\tan\varphi_{max}$

Sl. 3.2 Formule za izračun parametara i istovremene krivulje opterećenja [1]

Na slici 2.2. su navedene izračunske formule ekvivalente krivulje opterećenja parametara f i β, koje su podijeljene u dvije kategorije sa $\dot{P}_{max} = P_{max}$ i $\dot{P}_{max} = Q_{max}$. Ovi parametri su izračunati prosječnim faktorom snage i izračunom faktora snage u vrijeme najvećeg opterećenja, tako da ih se može lagano koristiti. Na slici 2.2., k_f se odnosi na omjer faktora jalovog opterećenja i faktora djelatnog opterećenja; $k_f = f_Q / f_p \cdot \cos\varphi_{max} = \cos\left[\tan^{-1}(Q_{max} / P_{max})\right]$ i s njim vršimo izračun faktora snage maksimalnog opterećenja. Kada se maksimalne vrijednosti djelatne snage, jalove snage i prividne snage pojave u isto vrijeme, $\cos\varphi_{max}$ je faktor snage u vremenu maksimalnog opterećenja. Ako gore navedeni uvjeti nisu ispunjeni, faktor snage nije stvarni faktor snage na određeno vrijeme, ali je izračun faktora snage prividne snage $\left(S_{max \cdot jx} = \sqrt{P_{max}^2 + Q_{max}^2}\right)$. f i β su izračunati formulama na slici 3.2. te smo dobili faktor gubitaka $\dot{F}$ ekvivalentne krivulje opterećenja:

$$\dot{F} = 0{,}639\,\dot{f}^2 + 0{,}361\,(\dot{f} + \dot{f}\dot{\beta} - \dot{\beta}) \tag{3-22}$$

3.4 Izračun gubitaka voda nakon kompenzacije jalove energije

3.4.1 Izračun parametara krivulje opterećenja nakon kompenzacije jalove energije

Omjer stvarne djelatne kompenzacije te minimalnog jalovog opterećenja naziva se stupanj jalove kompenzacije p; $p = Q_{com} / Q_{min}$. Kada je $p < 1$, to nazivamo podkompenzacijom; potpunom kompenzacijom nazivamo uvjet p=1; a uvjet $p > 1$ nazivamo prekomjernom kompenzacijom. Indeksi 1 i 2 se mogu koristiti za izražavanje parametara prije i poslije kompenzacije.

a) *Izračun parametara krivulje jalovog opterećenja podkompenzacijom*

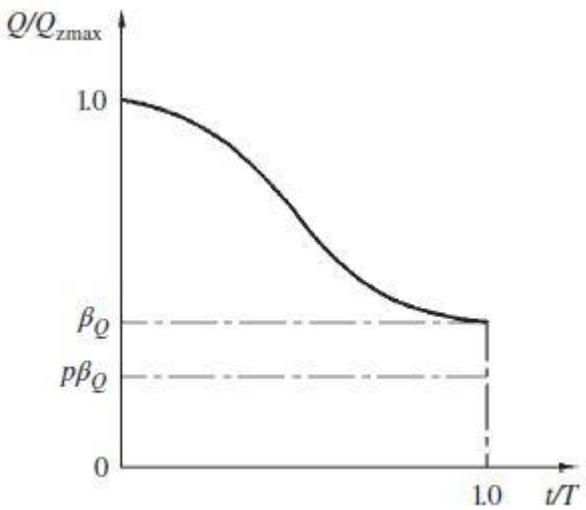
Kao što je prikazano na slici 3.3., kada je $p\beta_Q < \beta_Q$ vrijedi:

$$f_{Q2} = \frac{f_{Q1}Q_{\max 1} - Q_{com} \times 1}{(Q_{\max 1} - Q_{com}) \times 1} = \frac{f_{Q1} - p\beta_{Q1}}{1 - p\beta_{Q1}} \tag{3-23}$$

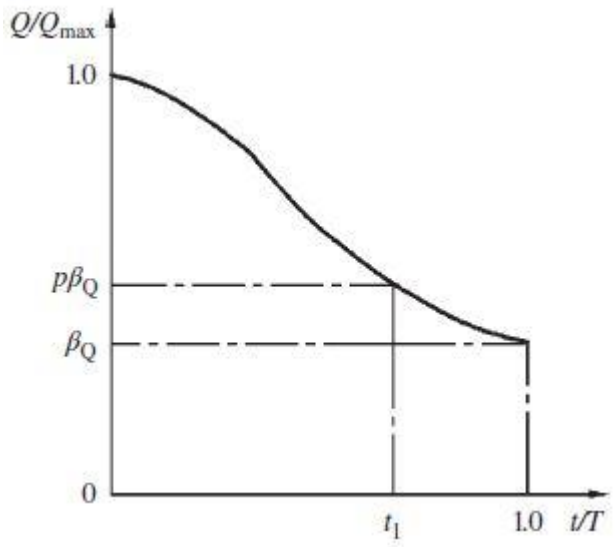
$$\beta_{Q2} = \frac{(\beta_{Q1} - p\beta_{Q1})}{Q_{\max 2}} = \frac{\beta_{Q1}(1-p)}{1 - p\beta_{Q1}} \tag{3-24}$$

$$\tan\varphi_{av2} = \frac{f_{Q2}Q_{\max 2}}{f_p P_{\max}} = \left(1 - p\frac{\beta_{Q1}}{f_{Q1}}\right)\tan\varphi_{av1} \tag{3-25}$$

Prema gornjim formulama, jalova kompenzacija mjenja oblik i karakteristiku parametara krivulje jalovih opterečenja, tako da vrijedi $f_{Q2} < f_{Q1}$, $\beta_{Q2} < \beta_{Q1}$, i $\tan\varphi_{av2} < \tan\varphi_{av1}$ nakon podkompenzacije, čime $\cos\varphi_{av2} > \cos\varphi_{av1}$. To ukazuje na manji faktor jalovog opterećenja i manjeg indeksa opterećenja ali većeg prosječnog faktora snage nakon kompenzacije. [2, str.86]



Sl. 3.3. Podkomenzacija, *p<1*



Sl. 3.4. p >1,Bespovratni prijenos jalove snage

b) Izračun parametara krivulja jalovog opterećenja slabe prekomjerne kompenzacije

Slaba prekomjerna kompenzacija znači da je jalovi kompenzacijski kapacitet veći od minimalnog jalovog opterećenja, ali manji od prosječnog jalovog opterećenja, i uključuje sljedeće dvije moguće situacije:

- Ako se kompenzacijski kapacitet može automatski regulirati, to je nepovratni prijenos jalove snage u vod. Na slici 3.4. je prikazano $Q(t_1) = p\beta_{Q1}$, t_1 prikazuje prvi dobiveni izračun faktora opterećenja f_{Q2} za cijeli period.

  Analizama krivulja jalovih opterećenja mnogih vodova pokazuje da kada je $f_{Q1} < 0{,}70$, pod uslovom da $f_{Q1} < \frac{1}{2}(1+\beta_{Q1})$ mora biti zadovoljen. Krivulja trajanja opterećenja može se koristiti za određivanje t_1:

$$p\beta_{Q1} = \beta_{Q1} + (1-\beta_{Q1})(1-t_1)^{\frac{1}{\lambda}} \tag{3-26}$$

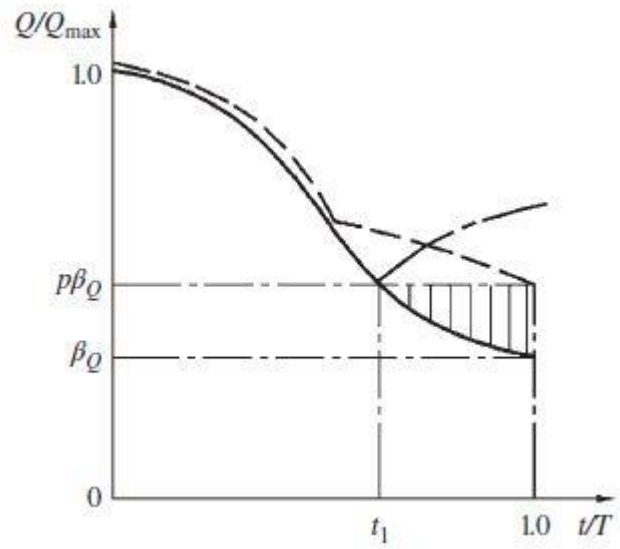
iz čega se može dobiti:

$$t_1 = 1 - \left[\frac{\beta_{Q1}(p-1)}{1-\beta_{Q1}}\right]^{\lambda} \tag{3-27}$$

- Ako se kompenzacijski kapacitet ne može regulirati, tu je kratki prijenos jalove snage u vod. Na slici 3.5., isprekidano područje je povratni prijenos jalove snage i

može se izračunati po $\int_{t_1}^{1}[Q_{com}-Q(t)]dt$, te se tako f_{Q2} može računati po sljedećoj formuli:

$$f_{Q2}=\int_{0}^{t_1}[Q(t)-Q_{com}]dt+\int_{0}^{1}[Q_{com}-Q(t)\,dt]\Big/Q_{\max 2} \qquad (3\text{-}28)$$



Sl. 3.5. p >1 povratni prijenos jalove snage

- *Izračun parametara krivulje jalovog opterećenja jake prekomjerne kompenzacije*

Jaka prekomjerna kompenzacija znači da je kapacitet kompenzacija jalove energije veći od prosjećnog opterečenja ali manji od maksimalnog jalovog opterećenja i to uključuje pod sljedeće dvije situacije.

Ako se kapacitet kompenzacije može automatski regulirati, tada je bespovratni prijenos jalove snage u vodu. f_{Q2} se može izračunati prema formuli (3-28) i prosječni faktor snage se može izračunati prema sljedećoj formuli:

$$\tan\varphi_{av2}=(1-p\beta_{Q1})\frac{f_{Q2}}{f_{Q1}}\tan\varphi_{av1} \qquad (3\text{-}29)$$

3.4.2 Izračun smanjenja gubitaka jalovom kompenzacijom

Izračun smanjenja gubitka jalovom kompenzacijom je važno za teorijski izračun gubitaka vodova, a također je i komplicirano, jer je ukupno smanjenje gubitaka također povezano s izazvanim gubicima električne energije prilikom prijenosa djelatnog opterećenja.[3]

- *Izračun efektivne kompenzacije visokim prirodnim faktorom snage*

Faktor snage prije kompenzacije općenito nazivamo prirodnim faktorom snage. Javni gradski vodovi i neki namjenski vodovi imaju visok prirodni faktor snage i općenito ispunjava uvjet $\cos\varphi_{av} > 0{,}7$. Dakle, prilikom izračuna gubitaka voda prije i poslije kompenzacije treba koristiti relevantne formule pod $\dot{P}_{\max} = P_{\max}$ prikazane u lijevom stupcu tablice na slici 3.2.. Izračun efektivne jalove kompenzacije biti će prikazan sa tri situacije u daljnjem dijelu teksta. [3, str.41]

a) U slučaju nedovoljne kompenzacije, najprije se računa kompenzacijski stupanj *p* na temelju prosječne snage nakon kompenzacije:

$$p = \frac{f_{Q1}}{\beta_{Q1}}\left(1 - \frac{\tan\varphi_{av2}}{\tan\varphi_{av1}}\right) \tag{3-30}$$

Zatim, korištenjem *p* za izračun parametara f_{Q2} i β_{Q2} krivulje jalovog opterećenja nakon kompenzacije, teba imati na umu da $\beta_{Q2} \neq \beta$, jer se β_{Q2} temelji na $Q_{\max 2}$, dok se β temelji na $\dot{P}_{\max} = P_{\max}$. Prema tome β se treba računati prema sljedećoj formuli:

$$\beta = \beta_{Q2} \tan\varphi_{av2} / k_{f2} \tag{3-31}$$

$$k_{f2} = f_{Q2} / f_P \tag{3-32}$$

Gdje je k_{f2} omjer faktora jalovog opterećenja i faktora djelatnog opterećenja nakon kompenzacije.

b) U slučaju prekompenzacije, kapacitet kompenzacije se može grupno uključivati bez povratnog prijenosa jalove snage. Prije svega, potrebno je odrediti stupanj kompenzacije *p*. Kada je $1 < p < f_{Q1} / \beta_{Q1}$, to je slaba prekompenzacija; kada je $f_{Q1} / \beta_{Q1} < p < \frac{1}{\beta_{Q1}}$, to je jaka prekompenzacija. Izračunavanje perioda t_1 za vrijeme prijenosa djelatne i jalove snage u vodovima, parametar f_{Q2} krivulje jalovog opterećenja se izračunava nakon kompenzacije i $\tan\varphi_{av2}$ prosječnog faktora snage nakon kompenzacije. Korištenjem t_1, $\tan\varphi_{av2}$ i f_p izračunava se parametar $\dot{f}_2$ Gubici električne energije ΔA mogu se računati po formuli:

$$\Delta A = \frac{R}{U_{av}^2} \dot{P}_{\max}^2 \dot{F}(1 + t_1) T \times 10^{-3} \qquad (t_1 \leq 1.0) \tag{3-33}$$

c) U slučaju prekomjerne kompenzacije, kompenzacijski kapacitet se ne može regulirati i dolazi do povratka prijenosa jalove snage. Postupak izračuna je isti kao i kod prethodnog slučaja. Treba imati na umu da se nakon jake prekompenzacije može računati prema formuli:

$$\tan\varphi_{av2} = (p-1)\beta_{Q1}\frac{f_{Q2}}{f_{Q1}}\tan\varphi_{av1} \tag{3-34}$$

i vrijednosti f_{Q2} slabe i jake prekompenzacije se mogu izračunati prema sljedećim formulama:

$$f_{Q2} = \frac{f_{Q1} - p\beta_{Q1}}{1 - p\beta_{Q1}} + 2\left(1 - t_1\right)\frac{\beta_{Q1}(p-1)\left(1 - f_{Q1}\right)}{\left(1 - \beta_{Q1}\right)\left(1 - p\beta_{Q1}\right)} \tag{3-35}$$

$$f_{Q2} = 2\left(1 - t_1\right)\frac{\left(1 - f_{Q1}\right)}{\left(1 - \beta_{Q1}\right)} - \frac{\left(p\beta_{Q1} - f_{Q1}\right)}{\left(1 - p\beta_{Q1}\right)} \tag{3-36}$$

- *Izračun efektivne jalove kompenzacije slabim prirodnim faktorom snage*

Ako je prirodni faktor snage $\cos\varphi_{av} < 0{,}70$, $\dot{P}_{\max} = Q_{\max 1}$, gubici električne energije će se računati po formuli:

$$\Delta A_1 = \frac{R}{U_{av}^2}\dot{P}_{\max}\dot{F}_1 \times 2T \times 10^{-3} = \frac{R}{U_{av}^2}Q_{\max 1}^2\dot{F}_1 \times 2T \times 10^{-3} \tag{3-37}$$

Ako je prosječni faktor snage $\cos\varphi_{av2}$ dosta manji od 0,70 poslije kompenzacije, vrijedit će:

$Q_{\max 2} > P_{\max}$, tako da je $\dot{f} = \frac{1}{2}f_{Q2}\left(1 + \frac{1}{\tan\phi_{av2}}\right)$, $\dot{\beta} = \beta_{Q2}$. Gubici električne energije su:

$$\Delta A_{v2} = \frac{R}{U_{av}^2}\dot{P}_{\max}^2\dot{F}_2 \times 2T \times 10^{-3} = \frac{R}{U_{av}^2}Q_{\max 2}^2\dot{F}_2 \times 2T \times 10^{-3} \tag{3-38}$$

3.4.3 Izračun krivulja godišnjih gubitaka električne energije za planiranje i dizajniranje energetske mreže

Tijekom faze planiranja i dizajniranja energetskih mreža, godišnje gubitke električne energije i godišnje operativne troškove pojedinih jedinica (glavni transformatori, vodovi i sl.) potrebno je izračunati, kako bi se usporedili tehnološki i ekonomski različiti programi te kako bi bili odabrani parametri električne opreme ili presjeci vodova. Budući da se izračun godišnjih gubitaka električne energije zasniva se na procjenama godišnjeg opterećenja krivulja, zahtjev o točnosti rezultata proračuna nije visok, ali metoda izračuna mora biti jednostavna i razumna. U

daljnjem dijelu potpoglavlja biti će opisani izračuni krivulja godišnjih gubitaka električne energije za tri naponska nivoa. [1, str.79]

3.4.3.1 Izračun krivulje godišnjih gubitaka električne energije 35 i 110 kV dalekovoda

Stručnjaci prikupljaju i analiziraju podatke o opterećenjima 35 kV i 110 kV dalekovoda kako bi utvrdili da li su veća jalova opterećenja u srednjenaponskim dalekovodima od predviđenih. U općim situacijama, dva faktora gubitaka takvih vodova su $f_Q > f_P$. Statistički izračun se može izvesti iz sljedećih formula:

$$f_Q = 0{,}0456 + 0{,}9871\, f_p \tag{3-39}$$

Uvrštavanjem prethodne formule u $f = \frac{1}{2}\left(f_p + f_Q \tan\varphi_{\max}\right)$, dobivamo formulu za indeks gubitaka godišnje ekvivalentne krivulje opterećenja:

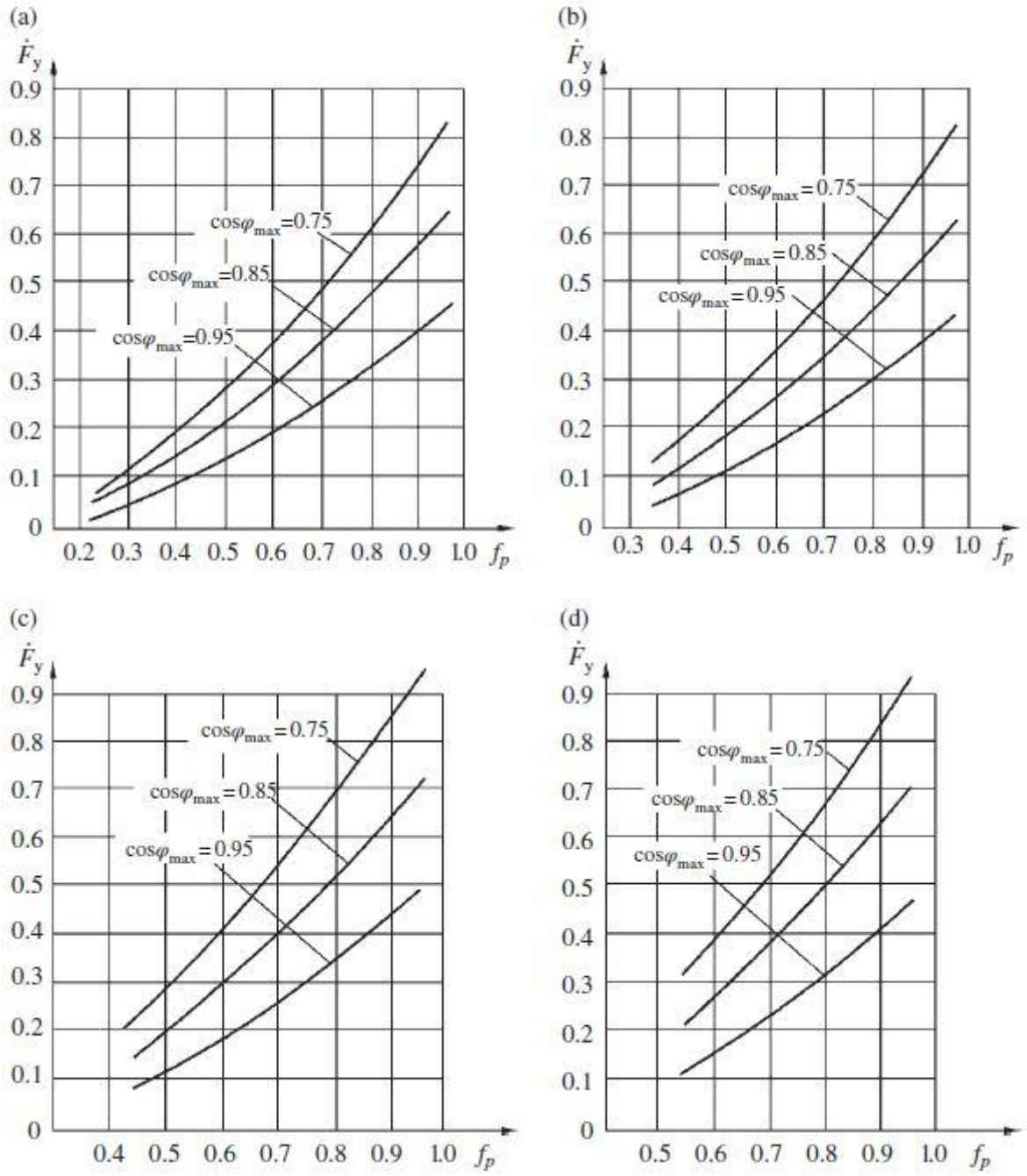
$$\dot{f}_y = f_p(0{,}5 + 0{,}4936 \tan\phi_{\max}) + 0{,}0228 \tan\varphi_{\max} \tag{3-40}$$

Uvrštavanjem prethodne formule u formulu (3-22), dobivamo formulu za izračun faktora gubitaka godišnje ekvivalentne krivulje opterećenja:

$$\dot{F}_y = 0{,}639\, \dot{f}_y + 0{,}361\, (\dot{f}_y + \dot{f}_y \dot{\beta}_y - \dot{\beta}_y) \tag{3-41}$$

gdje je $\dot{\beta}_y$ minimalni indeks opterećenja godišnje ekvivalentne krivulje opterećenja.

Korištenjem godišnjeg faktora djelatnog opterećenja f_p, faktor snage maksimalnog opterećenja $\cos\varphi_{\max}$ i $\dot{\beta}_y$ su varijable za izračun $\dot{F}_y$.



Sl. 3.6. Izračun krivulje godišnjih gubitaka električne energije u iznosu od 35 do 110 kV dalekovoda : (a) βy = 0.20 ; (b) βy = 0.30; (c) βy = 0.40 ; (d) βy = 0,50

Prema navedenom, kada su f_p i $\cos\varphi_{max}$ određene vrijednosti, veća razlika u $\dot{\beta}_y$ ukazuje na veću razliku u $\dot{F}_y$. Uzmimo za primjer, kada je $f_p = 60$, $\cos\varphi_{max} = 0{,}85$, $\dot{\beta}_y$ na 0,2 i 0,5, $\dot{F}_y$ na 0,3017 i 0,2473,odnosno, razlika dosegne 22%. To ukazuje na to da je potrebno uzeti u obzir minimalni indeks opterećenja $\dot{\beta}_y$ u izračunu godišnjih gubitaka električne energije.

3.4.3.2 Izračun krivulja godišnjih gubitaka električne energije 220 kV dalekovoda

Prije raznih izračuna, stručnjaci prikupljaju podatke i analiziraju dnevno opterećenje, kvartalno opterećenje, i godišnje opterećenje 220 kV-tnog dalekovoda, što ukazuje da je kompenzacijska oprema uvijek instalirana na krajevima takvog dalekovoda da prenosi više djelatne snage i smanjuje gubitke. Dakle, manja jalova opterećenja teku 220 kV-tnim dalekovodom. Krivulje opterećenja imaju dvije karakteristike, to su $f_Q < f_p$, $\beta_Q = 0$. Prema važnim analizama i izračunu prikupljenih podataka:

$$f_Q = 0{,}7874\, f_P - 0{,}0144 \tag{3-42}$$

Uvrštavanjem prethodne formule u $\dot{f} = \frac{1}{2}\left(f_P + f_Q \tan\varphi_{\max}\right)$, dobivamo formulu za izračun indeksa opterećenja od godišnje ekvivalentne krivulje opterećenja $\dot{f}_y$:

$$\dot{f}_y = f_P\left(0{,}5 + 0{,}3937 \tan\varphi_{\max}\right) - 0{,}0072 \tan\varphi_{\max} \tag{3-43}$$

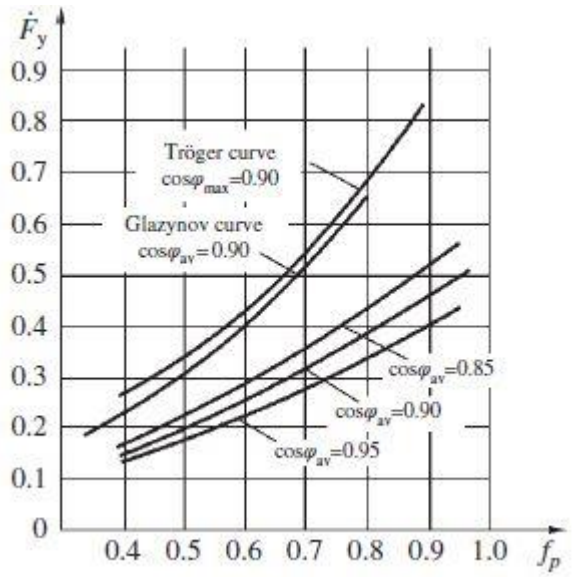
Dano je $\beta_Q = 0$, $\dot{\beta}_y = 0$, pa je formula faktora gubitaka godišnje ekvivalentne krivulje opterećenja:

$$\dot{F}_y = 0{,}639\, \dot{f}_y^{\,2} + 0{,}361\, \dot{f}_y \tag{3-44}$$

Korištenje faktora godišnjeg djelatnog opterećenja f_p i faktora snage $\cos\varphi_{\max}$ u vremenu maksimalnog opterećenja kao izračunate varijable $\dot{F}_y$ prema formulama (3-43) i (3-44), prikazano je u tablici 3.2. Prema podacima iz tablice 3.2. izračun krivulja godišnjih gubitaka električne energije 220 kV-tnog dalekovoda mogu biti prikazani na slici 3.7. [1, str.81]

Tab. 3.2 Izračunate vrijednosti $\dot{F}_y$ 220 kV dalekovoda

f_p / $\cos\varphi_{\max}$	**0,40**	**0,45**	**0,50**	**0,55**	**0,60**	**0,65**
0,85	0,1607	0,1890	0,2190	0,2508	0,2843	0,3196
0,90	0,1460	0,1713	0,1980	0,2264	0,2562	0,2876
0,95	0,1298	0,1518	0,1751	0,1994	0,2255	0,2525
f_p / $\cos\varphi_{\max}$	**0,70**	**0,75**	**0,80**	**0,85**	**0,90**	**0,95**
0,85	0,3567	0,3956	0,4362	0,4786	0,5228	0,5687
0,90	0,3205	0,3549	0,3908	0,4283	0,4673	0,5077
0,95	0,2809	0,3105	0,3415	0,3735	0,4070	0,4417



Sl.3.7. Izračunate krivulje godišnjih gubitaka električne energije za 220 kV dalekovod

Za usporedbu, slika 3.7. prikazuje krivulju gubitaka voda izračunate Troger metodom gdje je $\cos\varphi_{\max} = 0{,}90$ i krivulju gubitaka voda izračunate Glazynov metodom gdje je $\cos\varphi_{av} = 0{,}90$. Prema usporedbi, manji izračunati gubici voda imaju veću vrijednost $\dot{F}_y$. U okviru godišnjeg raspona indeks opterećenja od 0,50-0,70, vrijednost može biti veća od 39-62%. Glazynov krivulje se ne trebaju koristiti za izračun gubitaka u vodovima u inženjerskom projektiranju visokonaponskih i urbanim energetskim mrežama.

3.5 Teorijski izračun gubitaka električne energije u elektroenergetskoj mrežnoj jedinici

Do sada su bile objašnjene metode izračuna gubitaka u vodovima prema trenutnim parametrima krivulje opterećenja, kao i izračuni gubitaka voda s obzirom na faktor snage. U ovom dijelu će biti predstavljen izračun gubitaka električne energije u nadzemnim vodovima.

3.5.1 Klasifikacija gubitaka električne energije

a) Klasifikacija gubitaka gubitaka električne energije sa teorijskim izvodima za izračun

- *Nepoznati gubici koji se teško računaju*. Takvi gubici se sastoje od nepoznatih upravljanih i nepoznatih tehničkih gubitaka. Nepoznati tehnički gubici uključuju propuštanje gubitaka uzrokovanih lošom izolacijom vodova i gubitke električne energije uzrokovane opremom uzmeljenja ili grešaka kratkog spoja.

- *Tehnički gubici koji se mogu izračunati*. Ovi gubici se mogu dobiti teorijskim izračunom jer su oni poznati kao teorijski gubici voda. Tehnički gubici uključuju gubitke uzrokovane zagrijavanjem , gubitke dielektričnih magnetiziranja, gubitke dielektrične polarizacije i gubitke izazvane koronom.

b) *Klasifikacija kalkuliranjem tehničkih gubitaka promjenom zakona*

- *Gubici praznog hoda*. Takvi gubici ne ovise o struji koja prolazi mrežnim jedinicama, već su vezane uz napon mrežnih jedinica. Gubici praznog hoda se također nazivaju fiksnim gubicima.
- *Gubici opterećenja.* Gubici opterećenja su u izravnom razmjeru s kvadratom snage opterećenja ili struje koja prolazi mrežnim jeidnicama. Obično gubitke o nazivamo varijabilnim gubicima.

c) *Klasifikacija gubitaka električne energije različitim mrežnim jedinicama*

Gubici električne energije se mogu podjeliti na gubitke vodova, gubitke transformatora, i gubitke ostalih mrežnih jedinica.

- Gubici voda uključuju gubitke nadzemnih vodova. Gubici nadzemnih vodova se sastoje od gubitaka prijenosnih vodova, gubitaka distribucijskih vodova, i gubitaka niskonaponskih vodova.
- Transformatorski gubici uključuju gubitke u glavnim i distribucijskim transformatorima. Gubici glavnih transformatora se sastoje od gubitaka dvonamotnih i tronamotnih transformatora.
- Gubici ostalih mrežnih jedinica uključuju gubitke u opremi za kompenzaciju jalove energije (kondenzatorske baterije, sinkorne kompenzatore), jalove gubitke (visokonaponski i niskonaponski), transformatorske gubitke (strujni i naponski transformatori), gubitke u uklopnoj opremi i mjernim instrumentima.

3.5.2 Izračun gubitaka elektroenergetskih nadzemnih vodova

a) *Izračun gubitaka uzrokovanih koronom na dalekovodima*

Kao što je svima poznato, nepotpuno samopobuđeno koncentrično pražnjenje oko elektrode nazivamo korona. Za nadzemne vodove, kad intezitet rada električnog polja na površini visokonaponskog dalekovoda prevrši određenu jačinu, pojavit će se korona. Korona povećava djelatnu snagu te gubitke električne energije. Rezultati izračuna gubitaka visokonaponskih dalekovoda izazvanih koronom su jako važni za uvid u ekonomičnost samog rada. Te provjere donose ne samo određenu apsolutnu vrijednost (kW/km) godišnjih prosječnih

gubitaka snage po jedinici duljine, već i usporedbu između gubitaka izazvanih koronom i gubitaka izazvanih zagrijavanjem prilikom otpora u vodu. Općenito, gubici izazvani koronom bi trebali biti 10% manji u odnosu na gubitke uzrokovane toplinskim zagrijavanjem. [4, str.107]

Kada je maksimalni intenzitet polja na površini vodiča manji od kritične jakosti polja koji uzrokuje korona, izboj se može izbjeći. Dakle, u fazi projektiranja voda, inteziteti se moraju računati prema meteorološkim uvjetima u regijama gdje prolaze visokonaponski dalekovodi.

b) Izračun kritičnog inteziteta polja izazvanog nastajanjem korone.

Znanstvenici instituta jedne zemlje su iznijeli relacije koje bi se mogle koristiti za izračunavanje kritičnog inteziteta polja E_0 (kV/cm) prilikom nastajanja korone:

$$E_0 = 30{,}3M\sqrt{\delta}\left(1+\frac{0{,}3}{\sqrt{r_0\delta}}\right) \tag{3-45}$$

gdje je:

-M – koeficijent hrapavosti površine vodiča,

- r_0 – radius vodiča (cm),

- δ – relativna gustoća zraka.

Tab. 3.3. δ_h vrijednost na različitim visinama

H (m)	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500
δ_h	1	0,955	0,9085	0,865	0,824	0,784	0,745	0,708

$$E_0 = 30{,}1M\sqrt{\delta}\left(1+\frac{0{,}299}{\sqrt{r_0}}\right) \tag{3-46}$$

Sa atmosferskim tlakom p (MPa), temperature $t\ (^{\circ}C)$, relativna gustoća zraka može se izračunati prema sljedećoj formuli:

$$\delta_t = \frac{2892\,p}{273+t} \tag{3-47}$$

Za regije na visinama, relativna gustoća zraka može se izračunati prema slijedećoj formuli:

$$\delta_h = \delta_0\left(1+\frac{\alpha H}{T_0}\right)^{4{,}26} \tag{3-48}$$

gdje je:

- δ_0 – realtivna gustoća zraka pod standardnim uvijetima,
- H – visina (m),
- α – temperaturni gradijent zraka, oko 0,0065 $^\circ C/m$,
- T_0 – apsolutna temperatura pod standardnim uvijetima T_0 =273+20=293(K)

c) Izračun presjeka voda maksimalnog inteziteta polja E_M (kV/cm)

Za jednožilne vodove:

$$E_{M,} = \frac{C_W U_M}{r} \tag{3-49}$$

Za višežilne vodove:

$$E_M = K \times ,00147 \frac{C_W U_M}{n\,r} \tag{3-50}$$

Kad su višežilni vodovi složeni u poligonalni oblik:

$$K = 1 + \frac{2r}{a}(n-1) \times \sin\frac{\pi}{n} \tag{3-51}$$

$$C_{av} = \frac{24,1}{\tan\frac{D_{av}}{r_{eq}}} \tag{3-52}$$

$$D_{av} = \sqrt{D_{ab} D_{bc} D_{ca}} \tag{3-53}$$

gdje je:

- U_m – stvarni maksimalni radni napon voda (za duljinu voda <100 km, uzima se 1,1 puta nazivni napon; za vodove duljine > 100 km , uzima se 1,1 puta nazivni napon u prijašnjem poluodjeljku, i 1,05 puta nazivni napon u drugoj polovici dijela) ;
- r – izračunati radijus vodiča (cm);
- C_W - radni kapacitet vodiča različitih faza (pF/m);
- C_W = l.03 C_{av}; za srednje fazne žile , C_W = 1.10 C_{av} ;
- C_{av} – prosječni kapacitet trofaznog prijenosa dalekovoda,
- D_{av} – geometrijska udaljenost između trofaznih vodiča,
- D_{av}, D_{bc}, D_{ca} – udaljenosti između trofaznih vodiča,

- r_{eq} –ekvivalentni polumjer vodiča svake faze (za jednofazni: r_{eq} = r; za snop vodiča

$$r_{eq} = \sqrt[n]{r a_{av}^{n-1}}; cm),$$

- a_{av} – geometrijska udaljenost između snopnih vodiča,
- K– koeficijent koji se koristi u izračunu maksimalnog inteziteta površine polja snopnih vodiča,
- a – razmak između snopnih vodiča (cm).

Tab. 3.4 Srednji geometrijski razmak između snopa vodiča (cm).

n	2	3	4	5	6
a_{pj}	40	40	44,8	50,8	56

d) Usporedba kriterija

Prema usporedbama između dizajna i rada visokonaponskih dalekovoda u visokim predjelima nekih zemalja, u pogledu izračuna prema formulama (3-45) , (3-49) ili (3-50), ako maksimalni intezitet polja površine presjeka ne prelazi 85%, kritični intezitet polja počinje izazivati koronu, uvjetom $E_M / E_0 \leq 0{,}85$ nema korone pa će se dogoditi u vodu pod normalnim vremenskim uvjetima.

3.5.3 Izračun gubitaka uzrokovanih koronom pogonskog voda

Postoje mnogi faktori koji utječu na gubitke uzrokovane koronom, dok točne formule za izračun nisu još teorijski izvedene. Empirijska formula izvedena iz izmjerenih podataka ispitivanja ili općih izračunatih krivulja normalno se koristi za približno izračunavanje. Neki instituti prikupljaju i analiziraju mehanizme za pražnjenje vodiča i izmjerene podatake iz jednožilnih i snopnih vodiča, time se crtaju krivulje gubitaka uzrokovanih koronom koji su podjeljeni u četiri kategorije sa različitim klimatskim uvjetima: (I) ledeni i snježni dani, uključujući i inja; (II) kišni dani; (III) magloviti dani; (IV) lijepi dani, osim gore navedene tri vrste. Gubitak snage svakog vodiča po fazi ima funkcionalnu vezu s relativnom gustoćom zraka, izračunatim polumjerom vodiča r, i maksimalnim intezitetom električnog polja površine vodiča:

$$P_t = \frac{\Delta P_c}{n} = f \qquad (\delta_t r, E_M / \delta_t) \tag{3-54}$$

gdje je:

- P_t ili $\frac{\Delta P_c}{n}$ – gubici uzrokovani koronom svake faze vodiča i kilometra po različitim vremenskim uvjetima (kW),
- δ_t – relativna gustoća zraka, računa se po formuli (3-47),
- n – broj snopnih vodiča.

Kada su trofazni vodiči horizontalno raspoređeni, gubici električne energije korone ΔA_c $(kW \cdot h)$ unutar mjernog razdoblja mogu se izračunati prema sljedećoj formuli:

$$\Delta A_c = n\left[2\sum\left(P_{1t}T_t\right) + \sum\left(P_{2t}T_t\right)\right]L \tag{3-55}$$

gdje je:

- n – broj snopnih žila,
- T_t – trajanje vremenske prilike,
- L– duljina vodiča (km),
- P_{1t} – gubici snage svake faze i svakog kilometra po vremenskim uvjetima,
- P_{2t} – gubici snage svakog vodiča po srednjoj fazi i po kilometru vremenskog uvjeta.

3.5.4 Izračun gubitaka toplinskog otpora nadzemnih vodova

a) Ispravljanje izračuna otpora

Za izračunavanje gubitaka električne energije nadzemnih vodova, treba uzeti u obzir temperaturni porast izazvan strujom opterećenja i temperaturu okolnog zraka na promjenu otpora, te je izračun otpora R (Ω) nužno ispraviti:

$$R = R_{20}(1 + \beta_1 + \beta_2) \tag{3-56}$$

$$\beta_1 = 0{,}2\left(\frac{I_{rms}}{I_{ad}}\right)^2 \tag{3-57}$$

$$\beta_2 = \alpha\left(T_{av} - 20\right) \tag{3-58}$$

gdje je:

- R_{20} – otpor žile po fazi na $20^\circ C$ (Ω),
- β_1 – korekcijski koeficijent s obzirom na utjecaj porasta temperature žile na otpor,

- β_2 – korekcijski koeficijent s obzirom na utjecaj okolne temperature zraka prilikom otpora,
- T_{av} – prosječna okolna temperatura u mjernom razdoblju kod gubitaka voda ($^{\circ}C$),
- α – temperaturni koeficijent otpora žile (za aluminijske žice ili šuplje-čelične žice,
- $\alpha = 0{,}004$.

Prema formuli (3-58), kada temperatura u ljeto prelazi 32,5 $^{\circ}C$, ispravljeni gubici toplinskog otpora s obzirom na utjecaj temperature okoline su za 5% veći od onih koji nisu ispravljeni. Kada temperatura po zimi prelazi 7.5 $^{\circ}C$, gubici zbog toplinskog otpora su ispravljeni s obzirom na utjecaj temperature okoline i manji su za 5% od onih koji nisu ispravljeni. Općenito, kada je temperatura između 12-28 $^{\circ}C$, bez obzira na utjecaj temperature okoline izračunava se otpornost. [5, str.114]

b) Izračun gubitaka toplinske otpornosti od izdvojenih vodova

Ako su dobiveni operativni podaci u mjernom razdoblju, formula (3-59) se može koristiti za izračun gubitaka koji se događaju zbog zagrijavanja prilikom otpornosti $\Delta A\,(kW \cdot h)$:

$$\Delta A = 3 I_{rms}^2 RT \times 10^{-3} \tag{3-59}$$

gdje je:

- I_{rms} – rms struja u mjernom razdoblju (A),
- R – izračunata otpornost od no-branch vodova, koja je ispravljena s obzirom na sve faktore (Ω),
- T – mjerno razdoblje (h).

Kada je rms struja izračunata na temelju zapisa podataka struje u tipičnom danu, potrebno je ispraviti formulu kvadratnim omjerom između prosječne dnevne električne opskrbe unutar mjernog razdoblja i električne opskrbe nekog tipičnog dana. Ako su dobiveni unutar mjernog perioda minimalna struja, maksimalna struja, i faktor opterećenja, faktor gubitaka F se može izračunati prema formuli za faktor gubitaka:

$$F = 0{,}639 f^2 + 0{,}361(f + f\beta - \beta) \tag{3-60}$$

i gubitke nastale prilikom otpornosti zbog topline $\Delta A\,(kW \cdot h)$ se mogu izračunati prema formuli:

$$\Delta A = 3 I_{\max}^2 FRT \times 10^{-3} \tag{3-61}$$

Ako su unutar mjernog perioda dobiveni djelatna energija, jalova energija, prosječni napon, maksimalna struja, i minimalna struja, prosječna struja I_{av} unutar mjernog perioda može biti prva izračunata, a tada i faktor opterećenja f i minimalni indeks opterećenja β će biti izračunati. Faktor gubitaka se može računati prema formuli (3-60) a gubici nastali zbog toplinske otpornosti će biti konačno izračunati po sljedećoj formuli:

$$\Delta A = 3I_{av}^2 \frac{F}{f^2} RT \times 10^{-3} \tag{3-62}$$

$$I_{av} = \frac{\sqrt{A_P^2 + A_Q^2}}{\sqrt{3}U_{av}T} \tag{3-63}$$

$$f = I_{av} / I_{\max} \tag{3-64}$$

4. IZRAČUN GUBITAKA U VISOKONAPONSKIM MREŽAMA

4.1 Metoda procjene stanja

Procjena stanja znači u realnom vremenu obradu količine podataka za daljinsko mjerenje i daljinsko mjerenje podataka u vremenskom dijelu sustava. Daljinsko mjerenje informacija može predstavljati predmet manjih smetnji u različitim vezama prijenosa, što rezultira slučajne pogreške, a ponekad podliježu velikim preprekama (kvarovi opreme), što dovodi do velikih grešaka i loših podataka. Procjena stanja je metoda koja se koristi za istraživanje sveobuhvatnih uvjeta rada sustava pod nepotpunim uvjetima mjerenja. To je neka vrsta digitalnog filtriranja i mogućnosti predviđanja varijable stanja sustava od strane matematičkih metoda pod uvjetom da su mjerne točke raspoređene razumno i imaju određenu redundanciju (broj mjernih točaka je veći od broja varijabli stanja sustava), čime se dobiju podaci za cijeli pogonski sustav. Ako je mjerenje redundancije dovoljno veliko, moguće je otkriti uzrok loših podataka, pa čak i prepoznati bilo koju mjernu točku s lošim podacima i stupanj greške i time ispraviti loše podatke.

Razlika između algoritma procjene stanja i izračuna protoka opterećenja je ta da je broj mjernih točaka veći od broja sustava varijabli stanja tj. da je broj jednadžbi veći od broja izračunatih varijabli. Takve jednadžbe nazivaju se statički neodređene jednadžbe. Zbog pogreške u mjerenju, ove jednadžbe su međusobno neuskladive i ne mogu se izvesti određena rješenja.

Procjena stanja poprima optimizirane procjene metode, a najčešće se koristi metoda najmanjih kvadrata koja ima za cilj kako bi se smanjio zbroj kvadrata pogrešaka na svim mjernim mjestima, čime se dobije set optimalnih procjena sistemskih varijabli stanja. Rezultati dobiveni iz procjene stanja su točniji od mjerenja izravno prikupljenih vrijednosti i smanjene mjerne pogreške.

4.1.1 Procjena stanja bazirana na SCADA sustavu

Trenutno, SCADA sustavi u dispečerskim centrima nekih zemalja, u regionalnim mrežama vrše ažuriranje podataka svake tri sekunde i koriste dva načina rada. Učinkovita procjena stanja se ostvaruje u vremenu štednje, što znači otkrivanje loših podataka i nadopunjavanje podataka koji nedostaju. U posljednjih nekoliko godina, postignut je napredak procjene najmanjih kvadrata i brzo PQ opadanje se koristi u izračunu procjene stanja.

Za električnu mrežu sa sedam opterećenih točaka i jednim ekvivalentnim generatorom, kada je mjerna redundancija (omjer između broja mjernih vektorskih dimenzija m i broj procjenjenih dimenzija n) 1,40, ako razlika napona služi kao konvergencijski kriterij i pogreška

je $10^{-4} \sim 10^{-6}$ od referentnog napona, onda se konvergencija može uraditi kroz šest do osam proračuna tokova snaga uz brz pad PQ procjene stanja koji treba ukupno vrijeme od oko 5,6 ms.

Prema tim izračunima, ako se broj čvorova povećava za n puta, onda je broj potrebnih iteracija konvergencije općenito manje od n puta. Ako broj čvorova mreže dosegne opću veličinu prave regionalne mreže, broj potrebnih iteracija je gotovo 50 i ukupno vrijeme općenito ne više od 50.0 ms. Dakle, u postojećem uzrokovanju i spremanju uvjetima od SCADA sustava, brza procjena stanja algoritma može proizvesti potpuno i točno stanje sustava podataka i na taj način realizirati izračun gubitaka u realnom vremenu. [9, str.142]

4.1.2 Izračun gubitaka kombiniranjem procjene stanja sa excelom

Početkom 21. stoljeća, neke zemlje u kojima je razina SCADA sustava bila visoka, počele su istraživati primjenu procjene stanja mjerenjem gubitaka u stvarnom vremenu, slijedeći ova tri koraka:

1. Modificirati softver za procjenu stanja kako bi dopustio izlazu snagu na obje strane svake grane.

2. Uspostaviti prilagođenu ACCESS bazu podataka koja uključuje sljedeće baze podataka: (1) ime grane (voda ili transformatora), (2) vrijeme pokretanja izračuna gubitaka, (3) konačno vrijeme izračuna gubitaka, (4) prenesena djelatna (radna) snaga, (5) konačna prenesena djelatna (radna) snaga, (6) izračunati gubici u vodu, i (7) konačni izračun gubitaka u vodu. Sedmo polje se ponaša kao alternativa u slučaju neuspjeha divergencije procjene stanja, uzrokovanim mnogim greškama (errorima) u telemetrijskim podacima.

3. Poslati podatke gubitaka u vodu izračunate u ACCESS bazi podataka, za proces analize podataka u gubicima na daljnju analizu. U svrhu slojevite i sveobuhvatne analize gubitaka, provođenje klasificirane statistike o vodovima i glavnih transformatora i usvojiti oblik Excel-a s moćnim funkcijama za preračunavanje snage u električnim veličinama u vrijeme uzimanja uzoraka za akumulacije. Uvesti bitna polja iz Excel oblika i postaviti ih u okolici akomuliranih gubitaka, kako bi mogli prikladno i automatski izračunati i prikazati gubitke.

Jedno od efikasnijih tehničkih pomagala koji bi garantirali istovremenost mjerenja je GPS (global positioning system), koji radi pri frekvenciji od 1,5 GHz i maksimalna pogreška u pulsiranju po sekundi je 10 ns; GPS može obraditi sinkrone uzorke pogonskih električnih veličina elektrana i trafostanica u dalekovodima i pribilježiti vremenske oznake u svim prikupljenim podacima. U GPS poruci s izmjerenim podacima, vremenska oznaka se koristi kao polje za prijenos imena količine uzoraka i izmjerenih vrijednosti u ACCESS bazu podataka, i na

taj način se ostvaruje računska opeacija istovremenih vrijednosti snaga i tako se dovršava izračun gubitaka u stvarnom vremenu. [1, str.186]

4.1.3 Metoda bazirana na tipičnom danu mjerenja stvarnih opterećenja i procjene stanja

Da bi razumjeli maksimalna opterećenja i raspodjelu u regiji, te razumno dogovorili izvor napajanja i prijenos snage, razni analitičari i stručnjaci su proveli testiranje rada na velikim opterećenjima u posljednjih nekoliko godina. Dakle, dispečerski odjeli koriste stvarne mjerne podatke testova na velikim opterećenjima, metode estimacije stanja i opterećenja krivulje metodom za izračun gubitaka temeljene na tipičnom danu.

Međutim, način rada, količina prijenosa i distribucije električne energije, i temperaturni uvjeti nisu uvijek tipični za mjerno razdoblje velikih opterećenja, tako da razne faktore treba uzeti u obzir, te prilagoditi parametre izračuna gubitaka ali i odabrati određenu metodu za izračun.

4.1.3.1 Metoda izbora snage i količine električne energije

1. *Izračun gubitaka metodom snage*

Raznim mrežnim analizama i izračunima tokova opterećenja djelatne i jalove snage dobivaju se struje i naponi svake grane. Također i gubici djelatne i jalove snage mogu biti izračunati s obzirom na parametre snage mreže. Izračunati gubici električne energije će se akumulirati unutar 24 sata te se nazvati gubicima jednog reprezentativnog dana. Svaka metoda ima određene prednosti i nedostatke. Prednost ove metode je u tome da se gubici jalove snage dobiju u isto vrijeme, tako da se mogu lako analizirati naponski uvjeti kao i raspodjela jalove snage. Također, još jedna od prednosti ove metode je ta da se izračunati gubici svake grane mogu lako provjeriti zahvaljujući zapisima tokova snaga u realnom vremenu. Nedostatak ove metode je ta da gubici električne energije nisu izravno proporcionalni u odnosu na količinu električne energije, te da se ne koristi izmjerena raspodjela količine električne energije kod velikih opterećenja.[6, str.95]

2. *Izračun gubitaka metodom količine električne energije*

S prikazom raspodjela količine električne energije reprezentativnog dana i prikazom tipične krivulje opterećenja svakog opterećenja i čvorišta, uvodi se pojam koeficijenta izlazne raspodjele opterećenja. Ako se pretpostavi da postoje *n* opterećenja; maksimalna vrijednost tipične krivulje opterećenja je $p_{i.\max}$; opterećenje po satu je $p_{ij}\,(j = 1 - 24)$; količina dnevne električne energije je A_i; ukupna količina električne energije cijele mreže je A_Σ. Koeficijent izlazne raspodjele opterećenja može se izračunati prema slijedećoj formuli:

$$K_{ij} = \frac{A_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \frac{p_{ij}}{p_{i.\max}} = k_A f_{ij} \tag{4-1}$$

gdje je:

- $f_{ij} = p_{ij} / p_{i.\max}$ – trenutni faktor opterećenja i,

- $k_A = A_{\Sigma} / \sum_{i=1}^{n} A_i$ – gdje je k_A omjer ukupne količine električne energije cijele mreže reprezentativnog dana i zbroja količine električne energije od n opterećenja tipičnog dana krivulje opterećenja

Za izračun gubitaka reprezentativnog dana metodom količine električne energije, opterećenja svakog opterećenog čvorišta za 24 sata mogu biti izračunati prema sljedećoj formuli:

$$p_{ij} = k_{ij} p_{ij} (i = 1 \approx n,\ j = 1 \approx 24) \tag{4-2}$$

4.1.4 Sveobuhvatna metoda analize gubitaka baziranih na realnom vremenu podataka sustava

Uz postupno poboljšanje i praktične primjene u realnom vremenu dispečerski sustav upravlja informacijskim sustavom, i električnim sustavom mjerenja energije, te na taj način možemo dobiti nekoliko vrijednosti za teorijske gubitke u vodu. Tako neki stručnjaci predlažu opremanje sustava automatizacije i informacijskog sustava za upravljanje koji se temelje na teorijskim vrijednostima gubitaka voda i bazirani su na tokovima opterećenja, teorijskim vrijednostima gubitaka voda baziranih na procjeni stanja i vrijednostim statističkih gubitaka voda baziranih na mjerenju električne energije.

Koriste se i matematičke metode za analize integracije tri vrijednosti, stoga se očekuju pouzdanije vrijednosti teorijskih gubitaka voda.

4.1.4.1 Teorijski indeksi gubitaka voda bazirani na podacima sustava stvarnog vremena

1. *Izračun gubitaka voda u stvarnom vremenu baziranih na tokovima opterećenja*. Veliku ulogu kod provođenja proračuna tokova snaga u stvarnom vremenu ima SCADA sustav.

2 *Teorijski izračun gubitka voda temeljen na procjeni stanja*. Procjena stanja je jedan od naprednih softverskih programa u sustavu upravljanja energijom (EMS). Kao što je već spomenuto, procjena stanja je u mogućnosti identificirati i eliminirati loše podatke baze

podataka u SCADA sustavu u stvarnom vremenu. Teoretska vrijednost gubitka voda bazirana na procjeni se može dobiti istim postupkom kao što je objašnjen izračun gubitaka baziranih na tokovima opterećenja. U slučaju ne-konvergencije protoka opterećenja ili loših podataka, podaci procjene stanja mogu se referencirati. Ako točnost podataka dobivenih procjenom stanja nije visoka, podaci za izračun protoka opterećenja se mogu koristiti za provjeru.

3. *Statistički izračun gubitka u vodu temeljen na sustavu mjerenja električne energije.* On-line statistika se može u realnom vremenu provesti prema podacima sustava daljinskog očitanja brojila. Svaka pogreška u mjernom sustavu dovodi do fluktuacije kod stope gubitaka u vodu. Uslijed upravljanja gubicima u vodovima i drugih razloga za upravljanje, statistička greška stope gubitaka voda dobivene ovdje može biti veća nego u prethodna dva izračuna.

4.1.4.2 Teorijski izračun indeks gubitaka voda za tri opsežne metode

Tri opsežne vrijednosti indeks gubitaka voda X koja se može izračunati prema slijedećoj formuli:

$$X = W_1 X_1 + W_2 X_2 + W_3 X_3 \tag{4-3}$$

gdje je: X_1, X_2, X_3 - teorijski indeks gubitaka voda koji se temelji na protoku opterećenja, teorijski indeks gubitka voda temeljen na procjeni stanja i statistička indeks gubitaka voda koji se temelji na sustavu mjerenja električne energije;

W_1, W_2, W_3 – značenje tri stope gubitaka voda, koje se mogu odrediti sljedećim uvjetima

Cilj funkcije $a^2 W_1^{\ 2} + b^2 W_2^{\ 2} + c^2 W_3^{\ 2} = \min$

Ograničeno stanje $W_1 + W_2 + W_3 = 1$, i $W_1, W_2, W_3 \geq 0$

A, b, c su razlike (relativna vrijednost) između triju stopa gubitka voda posljednjeg dana, odnosno tekućeg dana. Nakon što se postigne važnost W_1, W_2, W_3, sveobuhvatna stopa gubitaka voda X može se biti izračunavati po formuli (4-3) i to je teorijski postotak gubitaka voda čija je pouzdanost veća od bilo koje stope gubitaka voda. Sveobuhvatni postotak stope gubitaka voda izračunava se ovom metodom i djeluje kao točna vrijednost i stopa gubitaka voda iz tri načina uspoređuje se s točnim vrijednostima izračunatim na zbroj srednjih kvadratnih pogrešaka. Ispada da je ukupno značenje kvadrata pogreške u izračunatoj stopi gubitaka voda metodom toka opterećenja najniža, te uzastopno slijedi da je statistički postotak gubitka voda i da je stopa

gubitaka voda izračunata procjenom stanja. To pokazuje da je stopa gubitaka izračunata metodom protočnog opterećenja možda najviše blizu stvarnoj vrijednosti u normalnim okolnostima.

Ova metoda daje većinu informacija u realnom vremenu i sveobuhvatno nudi visoko pouzdane vrijednosti gubitaka u realnom vremenu na temelju izračuna tri teorijske stope gubitka voda. Takvi se gubici u realnom vremenu procjenjuju kao dovoljno pouzdani iz perspektive matematičke obrade. U potrazi iz same metode, analiza konačnog rezultata teško je povezana s informacijama realnog vremena na kojima se svaka od specifičnih metoda temelji, a teško je analizirati utjecaj mrežnih operativnih parametara. U zaključku, ova metoda je učinkovita u kratkom roku teorijskim izračunom gubitaka voda koja je u svrhu provjere, no ne odnosi se na dugoročne teoretske izračune gubitaka voda. [8, str.62]

4.2 Ekvivalentna metoda čvorova snaga za izračun gubitaka u visokonaponskim mrežama

U proteklih nekoliko godina ova metoda se naširoko koristi u elektroenergetskim sustavima raznih zemalja.

4.2.1 Dvodimenzionalni red za izračun gubitaka u energetskim mrežama

Pretpostavimo da prijenosna mreža ima n izračuna jedinica gubitaka; obračunska razdoblja, T; vremenski interval između mjerenja je t_0. Gubici najvećeg djela mreže unutar mjernog intervala T, mogu se dobiti zbrajanjem gubitaka električne energije svake jedinice unutar $i(T/t_0)$ intervala T ili dobiti zbrajanjem gubitaka električne energije svih jedinica u okviru svakog mjerenja intervala T.

Izraz dvodimenzionalnog reda glasi:

	Jedinica (n) $\longrightarrow$			
Vrijeme (i) $\downarrow$	ΔA_{11}	ΔA_{12}	$\cdots$	ΔA_{1j}
	$\vdots$			
	ΔA_{i1}	ΔA_{i2}	$\cdots$	ΔA_{ij}

Gubici za prijenosnu mrežu unutar intervala T mogu se izračunati po sljedećoj formuli:

$$\Delta A_{\Sigma}\,|_{0}^{T} = \sum_{j=1}^{n}\left[\sum_{i=1}^{i=T/t_0}(\Delta A_{ij})\right] = \sum_{i=1}^{i=T/t_0}\left[\sum_{j=1}^{n}(\Delta A_{ij})\right] \tag{4-4}$$

gdje je:

- ΔA_{Σ} – ukupni gubici električne energije,
- $\sum_{j=1}^{n}\left(\Delta A_{ij}\right)$ – ukupna količina električne energije n opterećenja

4.2.2 Izračun gubitaka električne energije u mreži

Ako je razdoblje izračuna gubitaka električne energije jedan dan (tj 24 h), gubici električne energije u mreži mogu biti izračunati na sljedeća dva načina:

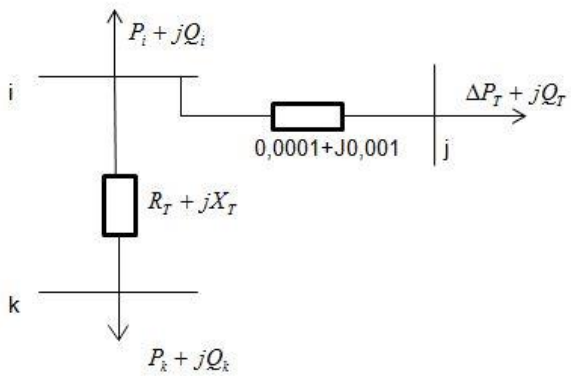
1. Pomnožimo prosječne gubitke snage svake obračunske jedinice s vremenom, a zatim ih zbrojimo:

$$\Delta A = \sum_{i=1}^{n}\Delta(P_{ij})_j T \tag{4-5}$$

gdje je:

- ΔA – gubici električne energije,
- P_{ij} – prosječni gubici snage,
- T – razdoblje izračuna gubitaka električne energije

Na slici 4.1 dan je prikaz čvorišta transformatorskog opterećenja i opterećenja bez gubitaka.



Sl. 4.1. Čvorište transformatorskog opterećenja i opterećenja bez gubitaka

2. Zbrajanjem gubitaka električne energije u mreži unutar svakog sata je

$$\Delta A = \sum_{i=1}^{24} (\Delta A_{ij}) = \sum_{i=1}^{24} \left(\sum_{j=1}^{n} \Delta P_{av} T \right) \tag{4-6}$$

gdje je:

- ΔA – gubici električne energije,
- P_{av} – prosječna djelatna snaga,
- A_{ij} – prosječni gubici električne energije.

Prema prvoj metodi količina energije u mreži je:

$$A = \left(\sum_{j=1}^{n} P_{av} \right) T + \Delta A = \sum_{j=1}^{n} (P_{av} T) + \sum_{j=1}^{n} (\Delta P_{av})_j T = \left[\sum_{j=1}^{n} P_{av} + \Delta P_{av}) \right] T \tag{4-7}$$

gdje je: - P_{av} – prosječna djelatna snaga,

- T – razdoblje izračuna gubitaka električne energije,
- ΔA – gubici električne energije.

Tada je indeks gubitka voda:

$$\Delta A\% = \sum_{j=1}^{n} (\Delta P_{av})_j T / T \left[\sum_{j=1}^{n} (P_{av} + \Delta P_{av}) \right] = \sum_{j=1}^{n} (\Delta P_{av})_j / \sum_{j=1}^{n} (P_{av} + \Delta P_{av})_j \tag{4-8}$$

gdje je: - $\Delta A\%$ – indeks gubitaka voda

- P_{av} – prosječna djelatna snaga
- ΔP_{av} – prosječni gubici radne snage

4.3 Izračun gubitaka u prijenosnim mrežama baziran na tri načina

Izračun tokova tipičnih opterećenja se provodi u tri točke odnosno tri moda, za dobivanje odgovarajućih prosječnih gubitka snage pod tipičnim svakodnevnim opterećenjima. Očito, tri vrste dnevnih prosjeka gubitaka radne snage mogu predstavljati ukupne gubitke energije unutar tri načina rada. Indeks gubitaka voda su na tri moda integrirani kako bi se dobio indeks gubitka unutar cijelog perioda, što je osnovni koncept izračuna gubitaka visokonaponskih mreža na temelju gubitaka snage u tri moda. [7,str.113]

Teorijski izračun gubitaka za dugačko razdoblje služi kao provjera i opisana je slijedećim koracima:

1. Primjena dugog razdoblja određena iz količine energije, kako bi se dobila prosječna opterećenja i primjena izmjerenih maksimalnih opterećenja za dobivanje dugog razdoblja faktora djelatnog opterećenja f_p, i minimalnog indeksa opterećenja β_p čime se dobiva

indeks promjene $1/X$. Dopuštene srednje snage za 3 načina odabrane su P_{1*}, P_{2*}, P_{3*} a zatim $P_{1*} = (\beta_p + P_{s.m})/2$, $P_{2*} = f_p$, $P_{2*} = (P_{m.b} + 1{,}0)/2$

2. Potrebno je odabrati tipične krivulje dnevnog opterećenja za tri moda, i omogućiti im dnevni maksimum opterećenja, odnosno $P_{1\max}, P_{2\max}, P_{3\max}$. Također je potrebno pomnožiti stvarno maksimalno opterećenje za cijelo razdoblje do vrijednosti po jedinici prosječne snage. Usporediti dnevni maksimum opterećenja s produktom, i uzeti $(P_{\Sigma.\max} P_{1*})/P_{1\max}$, $(P_{\Sigma.\max} P_{2*})/P_{2\max}$, $(P_{\Sigma.\max} P_{3*})/P_{3\max}$ kao koeficijente proporcionalnosti za podešavanje, čime se dobiva nova raspodjela tri načina tipičnih dnevnih opterećenja.
3. Provođenjem izračuna 24-satnih tokova snaga prilagođenom raspodjelom tri moda tipičnih svakodnevnih opterećenja, za dobivanje prosječnih dnevnih gubitaka energije $\Delta P_1\%$, $\Delta P_2\%$ i $\Delta P_3\%$
4. Korištenje tipične krivulje dnevnog opterećenja mreže na tri načina za izračun koeficijenata K_1, K_2, K_3 i korištenjem formule (4-4) izračunavamo indeks gubitaka $\Delta A_1\%$, $\Delta A_2\%$ i $\Delta A_3\%$ prema tri načina podjele.
5. Kao kombinacije koeficijenata niskog faktora opterećenja pojavljuju se u većini dugih razdoblja, prema slici 4.2. dobijemo omjer između električnih veličina na tri načina $A_1 : A_2 : A_3$ i izračunamo omjer električnih veličina na tri načina podjele ukupne količine električne energije $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3$.
6. Izračunavanje indeks gubitaka cijelog razdoblja računa se po sljedećoj formuli:

$$\Delta A_\Sigma\% = \Delta A_\Sigma / A = (\Delta A_1\% A_1 + \Delta A_2\% A_2 + \Delta A_3\% A_3)/(A_1 + A_2 + A_3) \tag{4-9}$$

gdje je:

- $\Delta A_\Sigma\%$ – indeks gubitaka cijelog razdoblja,
- ΔA_Σ – ukupni gubici električne energije,
- $\Delta A_1, \Delta A_2, \Delta A_3$ – indeksi gubitaka za tri načina podjele

Zamjenom omjera prosječnog opterećenja dobivamo:

$$\Delta A_\Sigma\% = 0{,}233\Delta A_1\% + 0{,}660\Delta A_2\% + 0{,}107\Delta A_3\% \tag{4-10}$$

gdje je:

- $\Delta A_\Sigma\%$ – indeks gubitaka cijelog razdoblja
- $\Delta A_1\%$, $\Delta A_2\%$, $\Delta A_3\%$ – indeksi gubitaka pojedinačnog

5. PRIMJERI IZRAČUNA I ANALIZE

5.1 Izračun gubitaka 110 kV dalekovoda prema dvije metode

Za visokonaponski dalekovod baznog napona 110 kV, duljine 50 km i otpornosti r_0=0,21 Ω/km. Faktor godišnjeg djelatnog opterećenja je $f_P = 0{,}5054$, minimalni indeks djelatnog opterećenja je $\beta_P = 0{,}2$, faktor godišnjeg jalovog opterećenja je $f_Q = 0{,}4901$ i minimalni indeks jalovog opterećenja je $\beta_Q = 0{,}2632$. Maksimalne snage dalekovoda su: $S_{\max} = 30{,}81\,MVA$, $P_{\max} = 25\,MW$ i $Q_{\max} = 19\,MVAr$.

1. *Izračun gubitaka električne energije pomoću $S_{\max}$ i F_s*

Kako bi izračunali faktor gubitaka djelatne i jalove snage, faktore godišnjih opterećenja i minimalne indekse opterećenja ćemo uvrstiti u sljedeće formule:

$$F_P = 0{,}639 f_P^2 + 0{,}361\left(f_P + f_P\beta_P - \beta_P\right) \tag{5-1}$$
$$= 0{,}639 \times 0{,}5054^2 + 0{,}361\left(0{,}5054 + 0{,}5054 \times 0{,}2 - 0{,}2\right)$$
$$= 0{,}3100$$

$$F_Q = 0{,}639 f_Q^2 + 0{,}361\left(f_Q + f_Q\beta_Q - \beta_Q\right) \tag{5-2}$$
$$= 0{,}639 \times 0{,}4901^2 + 0{,}361\left(0{,}4901 + 0{,}4901 \times 0{,}2632 - 0{,}2632\right)$$
$$= 0{,}2820$$

Maksimalna djelatna snaga i maksimalna jalova snaga ne pojavljuju se u isto vrijeme, pa prema tome vrijedi:

$$\cos\varphi_{\max} = \frac{P_{\max}}{S_{\max}} = \frac{25}{30{,}81} = 0{,}8114 \tag{5-3}$$

$$\sin\varphi' = \frac{Q_{\max}}{S_{\max}} = \frac{19}{30{,}81} = 0{,}6167 \tag{5-4}$$

Nakon izračunatih $\cos\varphi_{\max}$ i $\sin\varphi'$, možemo izračunati i vrijednost koja nam je potrebna kako bi dobili gubitke električne energije. Faktor gubitaka prividne snage se izračunava pomoću sljedeće formule:

$$F_S = F_P \cos^2\varphi_{\max} + F_Q \sin^2\varphi' \tag{5-5}$$
$$= 0{,}3100 \times 0{,}8114^2 + 0{,}2820 \times 0{,}6167^2$$
$$= 0{,}3113$$

Otpornost navedenog dalekovoda je:

$$R = r_0 \times l = 0{,}21 \times 50 = 10{,}5\Omega \tag{5-6}$$

Gubici električne energije su:

$$\begin{aligned}\Delta A &= \frac{R}{U_{av}^2} S_{\max}^2 \times F_s \times T \times 10^{-3} \\ &= \frac{10{,}5}{\left(110 \times 10^3\right)^2} \times \left(30{,}81 \times 10^6\right)^2 \times 0{,}3113 \times 8760 \times 10^{-3} \\ &= 224{,}63 \times 10^4\ kWh\end{aligned} \tag{5-7}$$

2. *Izračun metodom krivulje godišnjih gubitaka električne energije*

Vrijednosti minimalnog indeksa opterećenja β_P, faktora godišnjih djelatnih opterećenja f_P i faktora snage za vrijeme maksimalne prividne snage $\cos\varphi_{\max}$ ostaju iz prethodnog dijela primjera. Korištenjem interpolacije izračunom smo dobili $\dot{F} = 0{,}234$.

Prema formuli za izračun gubitaka električne energije dobivamo:

$$\begin{aligned}\Delta A &= \frac{R}{U_{av}^2} \dot{P}_{\max}^2 F \times 2T \times 10^{-3} \\ &= \frac{10{,}5}{\left(110 \times 10^3\right)^2} \times \left(25 \times 10^6\right)^2 \times 0{,}234 \times 2 \times 8760 \times 10^{-3} \\ &= 222{,}3 \times 10^4\ (kWh)\end{aligned} \tag{5-8}$$

Uspoređujući sa rezultatom iz prvog dijela primjera, dobivamo grešku izračuna:

$$\delta(\Delta A)\% = \left(\frac{222{,}3 - 224{,}63}{224{,}63}\right) \times 100\% = -1{,}02\% \tag{5-9}$$

5.2 Primjer izračuna gubitaka prijenosne mreže jednog tipičnog dana

U tablici 4.1 su navedena opterećenja te izmjereni gubici prikazani po satima jednog tipičnog dana u jednoj regiji. Tri načina izračuna gubitaka bazirana su na ukupnom opterećenju i mjerenju kroz 24 sata u jednoj regiji.

Tab. 5.1. Rezultati izračuna gubitaka u jednoj regiji

Sat	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**Ukupno**
Opterećenje (MW)	195	191	189	190	193	205	212	220	
Gubici (MW)	1,35	1,25	1,25	1,25	1,30	1,55	1,65	1,85	
Sat	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	
Opterećenje (MW)	229	240	234	214	223	233	236	239	
Gubici (MW)	2,15	2,50	2,45	1,75	2,00	2,30	2,40	2,50	
Sat	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	
Opterećenje (MW)	237	222	229	237	232	222	209	212	**5243**
Gubici (MW)	2,47	1,97	2,17	2,45	2,25	1,95	1,65	1,30	**45,71**

Provjera ispravnosti izračuna gubitaka metodom podjele u tri moda.

1. Izračunavanje parametara krivulje ukupnih opterećenja. Točke opterećenja su:

$$A = \sum_{1}^{24} P_i t = 5243\ MW \tag{5-10}$$

$$P_{av} = \frac{A}{24} = 218{,}45\ MW \tag{5-11}$$

$$P_{\max} = 240\ MW$$

$$f = \frac{P_{av}}{P_{\max}} = \frac{218{,}45}{240} = 0{,}91 \tag{5-12}$$

$$\beta = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = \frac{189}{240} = 0{,}79 \tag{5-13}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{(1-f)}{(f-\beta)} = \frac{(1-0{,}91)}{(0{,}91-0{,}79)} = 0{,}75 \tag{5-14}$$

gdje je:

- A – ukupno opterećenje,
- P_{av} – prosječno opterećenje,
- $P_{\max}$ – maksimalno opterećenje,
- f –faktor opterećenja,
- β – minimalni indeks opterećenja,
- $1/\lambda$ – index promjene opterećenja

Indeks dnevnih gubitaka snage je:

$$\Delta P\% = \frac{(\sum \Delta P_t)}{A} = \frac{45,71}{5243} = 0,87\% \tag{5-15}$$

gdje je:

- $\sum \Delta P_t$ – ukupni gubici,
- A – ukupno opterećenje

2. Izračun točaka snage na tri načina:

$f = 0,91$

Korištenjem formula za kombinaciju visokog faktora opterećenja dobivamo:

$$\begin{aligned} P_{s.m*} &= 0,008\,(1/\lambda)^2 - 0,1266\,(1/\lambda) + 0,9043 \\ &= 0,008 \times 0,75^2 - 0,1266 \times 0,75 + 0,9043 \\ &= 0,81385 \end{aligned} \tag{5-16}$$

$$\begin{aligned} P_{s.m} &= P_{sm*} \times P_{\max} \\ &= 0,81385 \times 240 \times 10^6 \\ &= 195,32\ MW \end{aligned} \tag{5-17}$$

$$\begin{aligned} P_{m.b*} &= 0,0052\,(1/\lambda)^2 - 0,0456\,(1/\lambda) + 0,9918 \\ &= 0,0052 \times 0,75^2 - 0,0456 \times 0,75 + 0,9918 \\ &= 0,9605 \end{aligned} \tag{5-18}$$

$$\begin{aligned} P_{m.b} &= P_{mb*} \times P_{\max} \\ &= 0,9605 \times 240 \times 10^6 \\ &= 230,52\ MW \end{aligned} \tag{5-19}$$

gdje je:

- $1/\lambda$ – indeks promjene opterećenja,
- $P_{\max}$ – maksimalno opterećenje

3. Izračun prosječnog opterećenja svakog podijeljenog moda

Minimalni mod

$$P_{s.av} = \frac{(\beta + P_{sm*})}{2} \times P_{\max} \tag{5-20}$$

$$= \frac{(0{,}79 + 0{,}81385)}{2} \times 240 \times 10^6$$

$$= 192{,}46\ MW$$

gdje je:

- β – minimalni indeks opterećenja,
- $P_{\max}$ – maksimalno opterećenje

Maksimalni mod

$$P_{b.av} = \frac{(P_{m.1} + 1)}{2} \times P_{\max} \tag{5-21}$$

$$= \frac{0{,}9605 + 1}{2} \times 240 \times 10^6$$

$$= 235{,}26\ MW$$

gdje je $P_{\max}$ maksimalno opterećenje.

4. Promjena indeksa gubitaka snage koja odgovara prosječnom opterećenju za tri moda

a) $P_{s.av}$ pri minimalnim modu rada odgovara snazi u 3 sata,a promjena indeks gubitaka snage je

$$\Delta P_s\,\% = \Delta P_{3*}\,\% \times (P_{s.av} / P_{3*})^2 \tag{5-22}$$

$$= (1{,}25/189) \times (192{,}46/189)^2$$

$$= 0{,}686\%$$

gdje je:

- ΔP_{3*} – omjer gubitaka snage i opterećenja u 3h,
- $P_{s.av}$ – prosječno opterećenje minimalnog moda,
- P_{3*} – izmjereno opterećenja u 3h.

b) P_{av} pri normalnom modu rada odgovara snazi u 8 sati, pa slijedi:

$$\Delta P_m\% = \Delta P_{8*}\% \times (P_{av} / P_{8*})^2 \tag{5-23}$$
$$= (1{,}85/220) \times (218{,}45/220)^2$$
$$= 0{,}829\%$$

gdje je:

- ΔP_{8*} – omjer gubitaka snage i opterećenja u 8h,
- P_{av} – prosječno opterećenje,
- P_{8*} – izmjereno opterećenje u 8h.

c) $P_{\max .av}$ pri maksimalnim modu rada odgovara snazi u 15 sati, pa slijedi:

$$\Delta P_b\% = \Delta P_{15*}\% \times \left(\frac{P_{b.av}}{P_{15*}}\right)^2 \tag{5-24}$$
$$= \frac{2{,}40}{236} \times \left(\frac{235{,}26}{236}\right)^2$$
$$= 1{,}01\%$$

gdje je:

- ΔP_{15*} – omjer gubitaka snage i opterećenja u 15h,
- $P_{b.av}$ – prosječno opterećenje maksimalnog moda,
- P_{15*} – izmjereno opterećenje u 15h

5. Izračun omjera količine električne energije za tri moda

Prema integralnoj operaciji iz krivulja opterećenja za kombinaciju parametara indeksa visokog opterećenja kad je 1/λ=0,60 omjer količine električne energije tri moda je $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 = 1 : 4{,}526 : 1{,}655$; kada je 1/λ = 0,80 vrijedi da je $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 = 1 : 4{,}80 : 2{,}33$. Prema izračunu korištenjem interpolacije kad je 1/λ =0,75 omjer količine električne energije tri moda je $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 = 1 : 4{,}70 : 2{,}15$.

6. Izračun gubitaka električne energije dijelimo na tri moda

Minimalni mod:

$$\Delta A_s = \frac{A_\Sigma \times \alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \Delta P_s \% \tag{5-25}$$

$$= \frac{5243 \times 10^6}{1 + 4{,}70 + 2{,}15} \times 0{,}68\%$$

$$= 4541{,}7\ kWh$$

Normalni mod:

$$\Delta A_m = \frac{A_\Sigma + \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \Delta P_m \% \tag{5-26}$$

$$= \frac{5243 \times 10^6 \times 4{,}70}{1 + 4{,}70 + 2{,}15} \times 0{,}829\%$$

$$= 26\,023{,}31\ kWh$$

Maksimalni mod:

$$\Delta A_b = \frac{A_\Sigma \times \alpha_3}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \Delta P_b \% \tag{5-27}$$

$$= \frac{5243 \times 10^6 \times 2{,}15}{1 + 4{,}70 + 2{,}15} \times 1{,}01\%$$

$$= 14\ 503{,}41\ kWh$$

gdje je:

- A_Σ – ukupna količina električne energije cijele mreže izmjerena na određenom danu,
- $\Delta P_s \%$ – indeks gubitaka snage pri minimalnom modu,
- $\Delta P_m \%$ – indeks gubitaka snage pri normalnom modu,
- $\Delta P_b \%$ – indeks gubitaka snage pri maksimalnom modu,
- α_1, α_2, α_3 – oznake za omjere količine električne energije

7. Izračun ukupnih gubitaka prema indeksu gubitka za cijelo razdoblje

Index gubitka snage za cijelo razdoblje je:

$$\Delta P_\Sigma \% = \frac{45{,}71}{5243} = 0{,}8718\% \tag{5-28}$$

.

Faktor gubitka izračunavamo pomoću koeficijenata f i β:

$$F = 0{,}639 f^2 + 0{,}361 (f + f\beta - \beta) \tag{5-29}$$
$$= 0{,}639 \times 0{,}91^2 + 0{,}361 (0{,}91 + 0{,}91 \times 0{,}79 - 0{,}79)$$
$$= 0{,}8319$$

gdje je:

-f – faktor opterećenja,

-β – minimalni indeks opterećenja

Koeficijent oblika krivulje ukupnih opterećenja je:

$$K = \frac{\sqrt{F}}{f} = \frac{\sqrt{0{,}8319}}{0{,}91} = 1{,}002 \tag{5-30}$$

gdje je:

- F – faktor gubitaka,
- f – faktor opterećenja

Korištenjem formule za izračunavanje indeks gubitaka električne energije za puno razdoblje dobivamo:

$$\Delta A_\Sigma \% = K \Delta P_\Sigma \% \tag{5-31}$$
$$= 1{,}002 \times 0{,}8718\%$$
$$= 0{,}884\ \%$$

$$\Delta A_\Sigma = A \Delta A_\Sigma \% \tag{5-32}$$
$$= 5243 \times 10^6 \times 0{,}884\%$$
$$= 44\ 536\ kWh$$

gdje je:

- K – koeficijent oblika krivulje ukupnih opterećenja,
- $\Delta P_\Sigma \%$ – indeks ukupnih gubitaka snage,
- A– ukupno opterećenje jednog reprezentativnog dana

Izračunom metodom pogreške došlo je do pogreške između gubitaka električne energije podjelom na tri moda i dobivenih rezultata mjerenjem indeksa gubitka, te slijedi:

$$\Delta A'_\Sigma = \Delta A_s + \Delta A_m + \Delta A_b \tag{5-33}$$
$$= (4{,}54 + 26{,}023 + 14{,}503) \times 10^6$$
$$= 45{,}06\ MWh$$

gdje su ΔA_s, ΔA_m, ΔA_b - gubici električne energije minimalnog,normalnog i maksimalnog moda

Relativna pogreška je:

$$\delta\Delta A_\Sigma = (\Delta A_\Sigma - \Delta A'_\Sigma)/\Delta A_\Sigma \times 100\% \tag{5-34}$$

$$= (44{,}536 - 45{,}06)/44{,}536 \times 100\%$$

$$= -1{,}19\%$$

gdje je:

- ΔA_Σ - ukupni gubici električne energije,
- $\Delta A'_\Sigma$ - ukupni gubici električne energije podjeljeni na tri moda

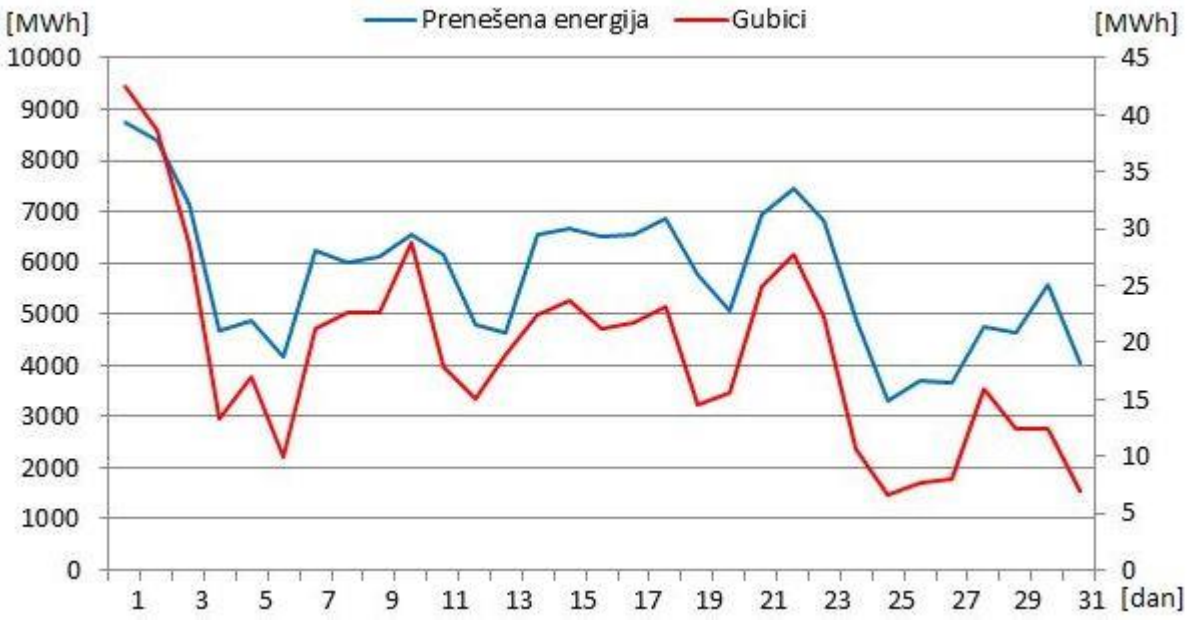
5.3 Analiza 400 kV dalekovoda Ernestinovo-Žerjavinec

Na temelju dnevnih dispečerskih energetskih izvještaja u tablici 5.2. prikazani su podaci izmjereni SCADA sustavom jednog mjeseca u godini za 400 kV dalekovod Ernestinovo-Žerjavinec. Podaci vrijede za prijenosnu mrežu HEP-a, prijenosnog područja Osijek.

Tab. 5.2. Izmjerena prenešena energija i njezini gubici po danima

Dan	**Prenešena energija (MWh)**	**Gubici (MWh)**	**Dan**	**Prenešena energija (MWh)**	**Gubici (MWh)**
1.	8730	42,5	**17.**	6568	21,7
2.	8380	38,6	**18.**	6850	23,2
3.	7124,4	28,6	**19.**	5784,8	14,6
4.	4661,2	13,3	**20.**	5065,6	15,5
5.	4853,6	17	**21.**	6931,6	25
6.	4160,4	9,9	**22.**	7453,6	27,7
7.	6258	21,3	**23.**	6834,8	22,3
8.	5988	22,7	**24.**	4910,4	10,6
9.	6142	22,7	**25.**	3325,2	6,6
10.	6568,8	28,7	**26.**	3680,8	7,6
11.	6145,6	17,8	**27.**	3655,2	8,1
12.	4806,8	15,1	**28.**	4754	16
13.	4645,2	19	**29.**	4637,6	12,4
14.	6566	22,5	**30.**	5579,6	12,4
15.	6675,6	23,7	**31.**	4049,6	6,9
16.	6504,8	21,3			

Prema tablici 5.2. napravljen je dijagram u kojem se jasno vidi omjer prenešene energije navedenog dalekovoda te izgubljene energije po danima u mjesecu. Na lijevoj skali dijagrama prikazani su podaci za prenešenu energiju, dok su na desnoj skali dijagrama podaci za gubitke.

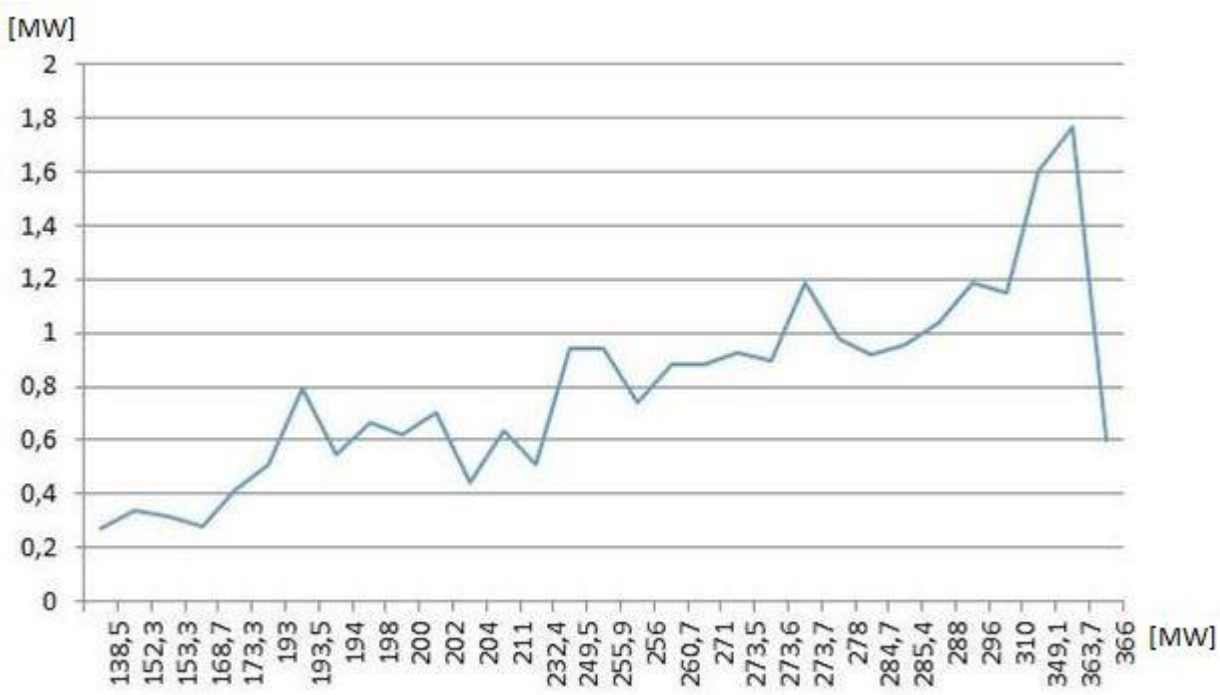


Sl. 5.1. Dijagram prenešene energije i gubitaka izmjerenih u jednom mjesecu

Tab. 5.3. Izmjerene snage i gubici 400 kV dalekovoda za jedan mjesec

Dan	**Srednja prenešena snaga (MW)**	**Srednja snaga gubitaka (MW)**	**Dan**	**Srednja prenešena snaga (MW)**	**Srednja snaga gubitaka (MW)**
1.	363,7	1,77	**17.**	273,6	0,90
2.	349,1	1,60	**18.**	285,4	0,96
3.	296	1,19	**19.**	366	0,60
4.	194	0,55	**20.**	211	0,64
5.	202	0,70	**21.**	288	1,04
6.	173,3	0,41	**22.**	310	1,15
7.	260,7	0,88	**23.**	284,7	0,92
8.	249,5	0,94	**24.**	204	0,44
9.	255,9	0,94	**25.**	138,5	0,27
10.	273,7	1,19	**26.**	153,3	0,32
11.	256	0,74	**27.**	152,3	0,34
12.	200	0,62	**28.**	198	0,67
13.	193,5	0,79	**29.**	193	0,51
14.	273,5	0,93	**30.**	232,4	0,51
15.	278	0,98	**31.**	168,7	0,28
16.	271	0,88			

Iz tablice 5.3 se mogu očitati omjeri opterećenja dalekovoda i gubitaka. Analizirajući navedeni dalekovod dolazimo do sljedećih saznanja. Kada je riječ o opterećenju u rasponu od 100-200 MW, gubici istoga sežu od 0,27 MW pa sve do 0,79 MW što preračunavanjem dobivamo da je raspon postotka gubitaka od 0,17-0,33%. Povećanjem opterećenja do 300 MW, gubici rastu i do 1,20 MW što je oko 0,40%. Najveći izmjereni gubici su 1,77 MW prilikom opterećenja od 363,7 MW što čini 0,49%.



Sl. 5.2. Dijagram ovisnosti opterećenja i gubitaka 400 kV dalekovoda

ZAKLJUČAK

Izračun gubitaka je bitan za donošenje referenci za rad i razvoj energetske mreže. Općenito je poznato da izračun gubitaka u elektroenergetskom sustavu ima dvije svrhe: utvrditi razliku između teorijskih vrijednosti i stvarnih gubitaka, utvrditi razlog za tu razliku, te predložiti mjere za smanjenje gubitaka; druga je procjeniti indekse gubitaka prema očekivanoj razini opterećenja, te osigurati osnovu za planiranje odjela za formuliranje različitih planova. Opterećenja elektroenergetskog sustava u vrućim ljetnim mjesecima znatno porastu, a maksimalna opterećenja regionalne mreže su koncentrirani unutar određenog perioda, pa se teorijski izračun gubitaka u vodovima energetske mreže provodi jednom godišnje, te se uvijek provodi na temelju krivulje opterećenja tipičnog dana u mjesecu sa maksimalnim opterećenjima.

Izračun gubitaka u mrežama visokog napona uključuje mnoge proračune koji se temelje na izračunu tokova opterećenja, i pri tome ih definiramo kao gubitak snage u vremenu. Napravljen je izračun gubitaka električne energije za jedan od visokonaponskih dalekovoda prema dvije metode. Uspoređujući dobivene rezultate došli smo do zaključka da su rezultati unutar dozvoljenih granica te da se te metode itekako mogu koristiti. To nam dokazuje da se za različite primjere mogu koristiti adekvatne metode izračuna.

Iz primjera izračuna gubitaka prijenosne mreže jednog tipičnog dana možemo zaključiti da je došlo do pogreške, koja je unutar dozvoljenih granica, između gubitaka električne energije podjelom na tri moda te dobivenih rezultata mjerenjem indeksa gubitaka. Prema dnevnim dispečerskim energetskim izvještajima SCADA sustavom je izmjerena transportna energija te gubici visokonaponskog dalekovoda Ernestinovo-Žerjavinec u PrP Osijek. Mjerenje je provedeno na mjesečnoj bazi od 31 dan. Analiza je pokazala da se ukupno gledajući gubici povećavaju s porastom opterećenja. Ovisno o rasponu transportne snage mjenjaju se i postotne vrijednosti porasta gubitaka.

LITERATURA

[1] A. Wu, B. Ni.,"Line loss analysis and calculation of electric power systems" 2016.

[2] Xiao Y. „Analysis of form coefficient of load curve" 2002.

[3] Zhang R., Zhao X., Li M., „Promotion of use of new energy-saving conductors in . transmission line. Electric Power Construction" 2012.

[4] Yu W., Xiaong Y., Zhou X., „Analysis of technical losses of power grids and loss reduction measures" 2006.

[5] Ni L. „Method and practice of theoretical calculation of losses by state estimation software" 2000.

[6] BDEW „Generating Plants Connected to the Medium-voltage Network" 2007.

[7] State Economic and Trade Commission of the PRC „Guidelines for Calculation of Electric Energy Losses of Power Grids" 2002.

[8] Ma W., Ao M., Cui M. „Test and analysis of energy-saving effect of energy-saving fitting" 2007.

[9] Wang S. „Influence of Harmonic on Electric Energy Metering" 2006.

[10] Chen Y., Chang Q „Study of GPS-based real-time loss calculation of electric power system" 1999.

[11] Zhang J., Luo S „Exploration of electric energy metering mode under influence of harmonic" 2002.

[12] J.R."Visokonaponske mreže i vodovi"

[13] Dr. sc. Kemal Hot „Elektroenergetske mreže, predavanja" 2005.

[14] Marija i Karlo Ožegović „Električne energetske mreže I" 1996.

SAŽETAK

Radi povećanja energetske učinkovitosti elektroenergetskog sektora, jedan od ciljeva Europske unije je smanjenje gubitaka u elektroenergetskim mrežama. Prijenosna mreža kao središnji dio elektroenergetskog sustava između ostalog brine o pouzdanosti isporuke te kvaliteti električne energije od proizvodnih jedinica do distribucijske mreže. Znamo da ukupnu energiju u prijenosnoj mreži možemo definirati kao razliku proizvedene električne energije i električne energije koju prijenosna mreža preda distribucijskoj mreži. Svako opterećenje prijenosne mreže izaziva gubitke u istoj. U radu je opisana problematika te vrste gubitaka u visokonaponskoj prijenosnoj mreži. Prikazane su metode za izračun gubitaka električne energije koje se temelje na različitim mjernim radobljima; za dan, mjesec, godinu. U radu su navedeni primjeri izračuna za određene prijenosne mreže te visokonaponske dalekovode gdje su prikazane neke od metoda koje su također opisane u teorijskom dijelu rada. U istom poglavlju su za primjer prikazani podaci sa dnevnih dispečerskih energetskih izvještaja gdje se jasno vide opterećenja voda te njegovi gubici

Ključne riječi: Prijenosna mreža, opterećenje, snaga, gubici, izračuni.

ABSTRACT

In order to increase the energy efficiency of the power sector, one of the objectives of the European Union is to reduce losses in power networks. Transmission network as a central part of the power system, among other things take care of delivery reliability and quality of electric power from generating units to the distribution network. We know that the total energy in the transmission network can be defined as the difference produced electricity and electricity transmission network which gives the distribution network. Each load of the transmission network caused losses in the same. The paper describes the issues and types of losses in high-voltage transmission network. The methods for calculating the energy losses that are based on different measurement allowance period; for day, month, year. The paper provides examples of calculation for certain transmission networks and high voltage transmission lines where they displayed some of the methods are also described in the theoretical part of the work. In the same chapter, for example, presented data from the day of dispatching the energy report are clearly visible load water and its losses.

Key words: Transmission network, load, power, losses, calculations.

ŽIVOTOPIS

Filip Mikulić je rođen 22. veljače 1992. u Županji. Živi u Gradištu. Pohađao je Osnovnu školu Gradište u Gradištu. Nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja upisuje se u Tehničku školu Županja u Županji, smjer – elektrotehničar, u kojoj maturira s vrlo dobrim uspjehom 2010. godine. Iste godine upisuje stručni studij na Elektrotehničkom fakultetu Sveučilišta J.J.Strossmayera u Osijeku, smjer – elektroenergetika. Završetkom stručnog studija 2013. godine stječe stručni naziv "Stručni prvostupnik (baccalaureus), inženjer elektrotehnike". Diplomski studij upisuje 2014. godine na istome fakultetu, smjer - elektroenergetika. Završetkom diplomskog studija 2016. stječe stručni naziv „Magistar inženjer elektrotehnike" sa naznakom smjera elektroenergetika.