

KORELACIJA FIZIČKOG I MATEMATIČKOG MODELA PRENOSNE MREŽE
CORRELATION BETWEEN PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL OF THE
TRANSMISSION NETWORK

Bojan Kuzmić, Vladan Krsman, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U ovom radu su prikazane aproksimacije koje se vrše nad prenosnom mrežom, njenom fizičkom modelu pri čemu se ne gube suštinske osobine, a sve u cilju povećanja efikasnosti izvršavanja matematičkih proračuna. Prikazani su konkretni praktični primeri koji u potpunosti opisuju važnost aproksimiranja. Takođe, navedene su i određene validacije koje je potrebno uvesti da bi se mogao kreirati što kvalitetniji matematički model prenosne mreže.

Ključne reči: Fizički model prenosne mreže, Matematički model prenosne mreže, Aproksimacije nad prenosnom mrežom, Korelacija podataka

Abstract – This paper presents the approximations that are performed over the transmission network, its physical model, without the essential features being avoided, all in order to increase the efficiency of the execution of mathematical calculations. Specific real-life examples are presented that fully describe the importance of approximating. Also, certain validations have to be introduced in order to create the highest quality mathematical model of the transmission network.

Keywords: Physical model of the transmission network, Mathematical model of the transmission network, Approximation of the transmission network, Data correlation

1. UVOD

Elektroenergetika kao jedna od podoblasti elektrotehnike se bave proizvodnjom, prenosom i distribucijom električne energije. Oblast koja se bavi elektroenergetskim sistemima se dalje grana u dva osnovna pravca. S jedne strane, velika pažnja se poklanja izučavanju stacionarnih (ili statičkih) pojava u sistemu, što podrazumeva neizbežnu upotrebu modela zasnovanih na algebarskim jednačinama.

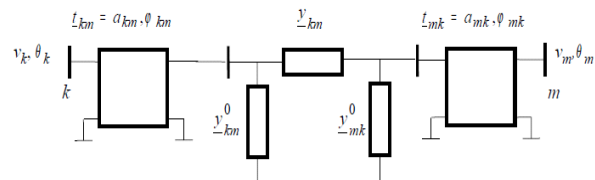
Ovde se proračunavaju moduli i fazni uglovi fazora napona u čvorovima, kao i druge sistemske promenljive. Potrebne su razne aproksimacije kojima se fizički model uprošćuje da bi se dobio što tačniji i lakši matematički model.

NAPOMENA:

Ovaj rad je proistekao iz master rada čiji mentor je dr Vladan Krsman, docent.

2. OSNOVE MATEMATIČKOG MODELA PRENOSNE MREŽE

Matematički modeli elemenata elektroenergetskog sistema, koji se deli na proizvodnju, prenos i distribuciju, definisani su za opštu (fiktivnu) granu („unified branch model“). Statički model opšteg nesimetričnog π – elementa prikazan je na slici 1. Šema praktično važi za sve moguće modele elemenata.



Slika 2.1 – Statički model opšteg nesimetričnog π – elementa

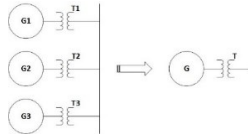
- v_k, θ_k – moduo i fazni stav fazora napona u čvoru k ,
- v_m, θ_m – moduo i fazni stav fazora napona u čvoru m ,
- t_{km}, t_{mk} – kompleksni regulacioni prenosni odnos sa strane k -tog, odnosno m -tog čvora,
- a_{km}, a_{mk} – realni (nenominalni) deo prenosnog odnosa sa strane k -tog, odnosno m -tog čvora,
- $\varphi_{km}, \varphi_{mk}$ – fazni pomeraji sa strane k -tog, odnosno m -tog čvora,
- y_{km} – admitansa između tačaka k i m ,
- y_{km}^0, y_{mk}^0 – otačna admitansa sa strane k -tog, odnosno m -tog čvora.

3. KOMPATIVNA ANALIZA MATEMATIČKOG I FIZIČKOG MODELA PRENOSNE MREŽE

Modeli prenosnih vodova, tj. aproksimacije prenosnih vodova su klasifikovane po njihovoj dužini. Ove klasifikacije su:

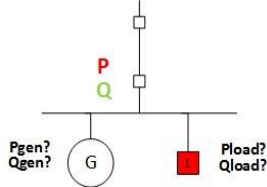
- *aproksimacija kratkog voda* za sve vodove koji su kraći od 80 km,
- *aproksimacija srednje dužine* za sve vodove čija je dužina između 80 i 250 km,
- *aproksimacija dugih vodova* za sve vodove koji su duži od 250 km.

Aproksimacija proizvodnje je predstavljena u nekoliko slučajeva koji će biti prikazani ispod. Kada se posmatra elektrana kao izvor, koja sadrži određeni broj proizvodnih jedinica, tada se vrši aproksimacija jednom proizvodnom jedinicom.



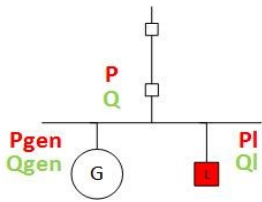
Slika 3.1 – Aproximacija više proizvodnih jedinica

Na lici 3.2 prikazan je sličan slučaj kada postoje merenja na bližem prekidaču, samo što u ovom slučaju nije zanemarljiva dužina voda.



Slika 3.2. Specifičan slučaj kada postoji merenja samo na bližem prekidaču

Jedna od varijanti je da se zanemari opterećenje i da se samo duplira merenja sa prekidača i pridruži generatoru sa inverznim signalom. U još boljem slučaju ako znamo krive potrošnje, proizvodnju snage generatora, može se aproksimirati snaga koja se detektuje kao opterećenje generatora (na slici označeno sa L). Snaga opterećenja generatora obično predstavlja od 1 do 6% vrednosti snage generatora (u zavisnosti koja je vrsta generatora). Na slici 6 je predstavljena situacija.



Slika 3.3. Računanje sopstvenog opterećenja generatora na osnovu njegove snage

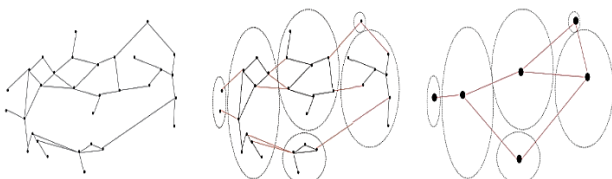
$$\begin{aligned} P &= P_{gen} - P_l, \text{ (a)} \\ P &= P_{gen} - 0.06 \cdot P_{gen}, \text{ (b)} \\ P_{gen} &= P/0.94. \text{ (c)} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Q &= Q_{gen} - Q_l, \text{ (a)} \\ Q &= Q_{gen} - 0.06 \cdot Q_{gen}, \text{ (b)} \\ Q_{gen} &= Q/0.94. \text{ (c)} \end{aligned} \quad (2)$$

Ovo je dobar način za povećanje redundanse bez stvarnih merenja.

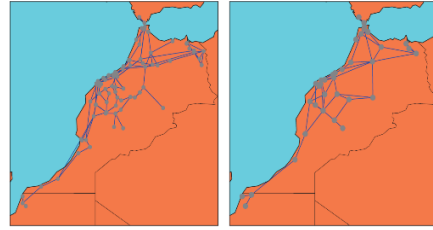
Dodatni vid aproksimacije prenosne mreže može se dobiti koristeći **Kron**-ovu redukciju uvažavajući limite vodova, koja je široko korišćena metoda za pojednostavljenje originalnog modela. Zasniva se na sukcesivnoj eliminaciji čvorova.

Primer jedne konkretne redukcije dat je na slici 3.4.



Slika 3.4 – Primer redukcije jednog prenosnog sistema

Na slici 3.5 je predstavljen redukovani sistem prenosne mreže Maroka (200 kV i više). Originalan model sadrži 857 čvorova (leva strana), dok redukovani sadrži samo 40 (desna strana).



Slika 3.5 – Originalan i redukovani model prenosne mreže Maroka

4. STATIČKA ESTIMACIJA STANJA

Izraz vektora promenljivih stanja su:

$$\mathbf{x} = [V \ \theta \ a_i \ \phi_i]^T \quad (4.1)$$

Vektor merenja (\mathbf{z}) povezan je sa vektorom promenljivih stanja (\mathbf{x}) preko nelinearne jednačine [3]:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{e}, \quad (4.2)$$

gde je:

\mathbf{e} – M-dimenzioni slučajni vektor grešaka merenja.

Merenja koja se koriste u proračunu statičke estimacije stanja su:

$$\mathbf{z} = [P_i^T \ Q_i^T \ I_i^T \ P^T \ Q^T \ I^T \ V^T \ a_i^T \ \phi_i^T]^T, \quad (4.3)$$

Sva merenja se mogu podeliti na telemetrisana merenja, pseudo-merenja i virtuelna merenja.

Metod minimuma sume otežanih kvadrata odstupanja - WLS (Weighted Least Squares) metod, je najčešće korišćeni algoritam u statičkoj estimaciji stanja.

Ovako definisani problem u matematičkoj formi može se izraziti kao:

$$\min_{\mathbf{x}} \{J(\mathbf{x}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]\}, \quad (4.4)$$

ukupna suma kvadrata reziduala merenja koja se minimiziraju.

Struktura jednačine tokova snaga omogućava da se u cilju verifikacije validnosti većine podataka sprovede niz testova konzistentnosti. Primeri ovih testova za razne tipove merenja korišćena u ovom radu su sledeći:

- Za merenje injektiranja i tokova snaga na istom i/ili na susednom povezanom čvoru.
- Za merenja injektiranja i napona i struja na jednom kraju grane (validnost merenja na krajevima grana).
- Za tokove snaga merenje na oba kraja grana (validnost merenja na krajevima grana).

Postoji 8 mogućih podataka o analognim merenjima (sa SCADA sistema u realnom merenju). Testiranje će se vršiti tako da postoje 3 od pomenutih 8. Broj mogućih kombinacija merenja je 56. U okviru poglavlja Primena je na konkretnom primeru mreže pokazano je validiranje po datim stavkama.

5. PREDLOG NOVIH PRAVILA ZA VERIFIKACIJU KVALITETA MATEMATIČKOG MODELA PRENOSNE MREŽE

U svrhu detekcije loših podataka i poboljšanja proračuna u prenosnoj mreži, moguće je uraditi određene provere fizičkog modela na osnovu kojih će se izvršiti modifikacija samog matematičkog modela prenosne mreže. U tekstu ispod će biti predstavljene neke od njih.

- **Granica između prenosnog i distributivnog dela mreže**

Na graničnim čvorovima treba da postoji „granični element“, koji u fizičkom modelu ne postoji, nego samo modelski služi za beleženje napona i faznih stavova od kojih počinju proračuni distributivne mreže. Prenosni deo mreže „vidi“ granične tačke kao PQ čvorove tako da se u proračunima u prenosnom delu koriste vrednosti za P i Q dobijene iz distributivnog dela mreže dok se u proračunu u distributivnom delu koriste vrednosti za V i θ dobijene iz proračuna za prenosni deo mreže.

- **Transformatori sa istom nominalnom snagom na primaru, sekundaru i tercijaru**

Slučaj opisan u naslovu ovog paragrafa definitivno može da pravi problem u proračunima i tačnošću rezultata. Može da se desi da importom podataka stignu ovakve vrednosti u model, pa je potrebno da postoji određeni vid validacije za ovakvo stanje, jer je fizički nemoguće da transformator ima iste nominalne snage (S_{n1} , S_{n2} , S_{n3}) na različitim namotajima.

- **Detekcija transformatora sa očigledno lošim podacima ogleđa kratkog spoja i praznog hoda**

Vrednosti za napon kratkog spoja dvonamotajnog transformatora u_k [%], struja praznog hoda i_o [%], gubici u bakru P_{Cu} [J] i gubici u gvožđu P_{Fe} [J] su osnovni podaci koje obično dostavlja proizvođač. Pomoću njih se određuju vrednosti za Z i R. Ukoliko vredi izraz:

$$|Z| < R, \quad (5.1)$$

potrebno je detektovati na koji se transformator odnose dati početni podaci. Takođe, ista priča se odnosi i na parametre Y i G. Ukoliko vredi izraz:

$$|Y| < G, \quad (5.2)$$

potrebno je detektovati na koji se transformator odnose dati početni podaci.

- **Poravnatost broje otepa na namotaju transformatora i položaja regulacione sklopke na njemu**

Postoje dve moguće opcije neslaganja broja otepa na namotaju transformatora i položaja regulacione sklopke na njemu:

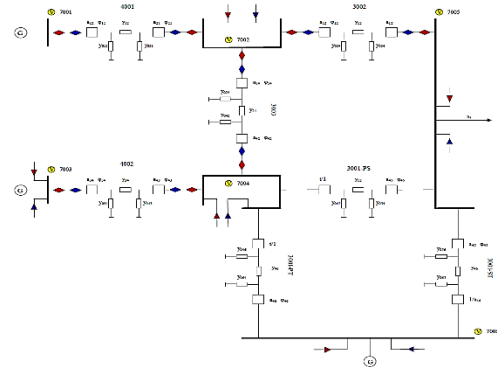
- $RS > T$

- $RS < T$.

U prvom slučaju broj otepa na namotaju transformatora (T) je manji od pozicije regulacione sklopke (RS), tako da postoje neupotrebljivi položaji regulacione sklopke na njemu. U drugom slučaju je obrnuta situacija, tako da postoje „mrtvi“ otepi na namotaju transformatora.

6. PRIMENA

Testiranje merenja će se vršiti na zadatom jednostavnom elektroenergetskom sistemu (test mreži) čija je šema prikazana na slici 6.1.



Slika 6.1. Izgled test mreže sa svim parametrima

Legenda:

- ▶ - oznaka da u odgovarajućem čvoru postoji merenje injektirane aktivne snage (P_{inj}),
- ▶ - oznaka da u odgovarajućem čvoru postoji merenje injektirane reaktivne snage (Q_{inj}),
- ◆ - oznaka da po odgovarajućoj grani postoji merenje toka aktivne snage (P_{line}),
- ◆ - oznaka da po odgovarajućoj grani postoji merenje toka reaktivne snage (Q_{line}),
- - oznaka da u odgovarajućem čvoru postoji merenje napona (V).

Kada se može izvršiti samo jedan test

Neka je u skupu merenja izvršena simulacija lošeg merenja napona, gde je umesto izmerenog napona u čvoru sa šifrom 7001 (čvor broj 1), sa vrednošću od 240kV, simulirano loše merenje u vrednosti od 200kV.

TEST 1

U ovom slučaju izmerena vrednost napona je manja od donje dozvoljene termičke granice i testiranje se završava, odnosno merenje napona u čvoru sa šifrom 7001 je označeno kao pogrešno.

$$V_{mereno} \leq V_d \quad (6.1)$$

tj. Nije zadovoljen uslov da se napon nalazi u unapred dozvoljenim granicama.

$$V_d \leq V_{mereno} < V_g \quad (6.2)$$

Kada se mogu izvršiti dva testa

Ako bi se pretpostavilo da je u skupu merenja izvršena simulacija lošeg merenja napona, gde je umesto

izmerenog napona u čvoru sa šifrom 7003 (čvor broj 3), sa vrednošću od 420kV simulirano loše merenje u vrednosti od 430kV.

TEST 1

Test je negativan jer je zadovoljena jednačina $V_d \leq V_{mereno} < V_g$ tj. simulirani izmereni napon se nalazi u okviru tehničkih granica i testiranje može da se nastavi dalje.

TEST 2

Test u ovom slučaju nije moguće izvršiti jer ne postoji merenje injektirane struje i injektirane aktivne i reaktivne snage u čvoru pod šifrom 7003.

TEST 3

Izvršava se provera stanja dela mreže između čvora sa šifrom 7003 i čvora sa šifrom 7004, akcenat je na grani 4002 između pomenutih čvorova. Pod pretpostavkom da imamo merenja V_{7003} , P_{7003} i Q_{7003} , pozivajući se na kombinaciju 1, dobiće se stanje dela mreže na grani pod šifrom 4002. Onda se vrši poređenje promenljivih koje su dobijene proračunom iz kombinacije 1 na osnovu poznavanja merenja V_{7001} , P_{7001} , Q_{7001} , i to P_{7002} , Q_{7002} , V_{7002} sa merenim vrednostima datih promenljivih. Test je pozitivan, tj. zaključak je da je u skupu merenja V_{7003} , P_{7003} i Q_{7003} neko od merenja sumnjivo.

Kada se mogu izvršiti sva tri testa

Pod pretpostavkom da je u skupu merenja izvršena simulacija lošeg merenja napona, gde je umesto izmerenog napona u čvoru sa šifrom 7002 (čvor broj 2), sa vrednošću od 235kV, simulirano loše merenje u vrednosti od 220kV.

TEST 1

Test je negativan jer je zadovoljena jednačina $V_d \leq V_{mereno} \leq V_g$, tj. simulirani izmereni napon se nalazi u okviru tehničkih granica i testiranje može da se nastavi dalje.

TEST 2

Test u ovom slučaju moguće je izvršiti jer postoje sva potrebna merenja potrebna za izvršenje ovog testa. Pod pretpostavkom da postoje merenja na osnovu kojih se izračuna injektirana struja u čvoru pod šifrom 7003 i poredi se ta vrednost sa stvarnim merenjem injektirane struje I_{7002} .

$$I_{izračunato} = \frac{\sqrt{P_{7002}^2 + Q_{7002}^2}}{V_{7002}}; \quad (6.3)$$

Dobije se razlika između prave merene vrednosti I_{7003} i izračunate vrednosti. Test je pozitivan, pa se dolazi do zaključka da u skupu merenja V_{7001} , P_{7001} , Q_{7001} postoji neko sumnjivo merenje.

TEST 3

Izvršava se provera stanja dela mreže između čvora sa šifrom 7002 i čvora sa šifrom 7004, odnosno akcenat se stavlja na granu 3003 između njih. Pod pretpostavkom da postoje merenja V_{7003} , P_{7003} i Q_{7003} , pozivajući se na kombinaciju 1, dobiće se stanje dela mreže na grani pod šifrom 3003. Nakon svega, vrši se poređenje promenljivih koje su dobijene proračunom iz kombinacije 1 i na osnovu poznavanja merenja V_{7003} , P_{7003} , Q_{7003} , i to P_{7002} , Q_{7002} , I_{7003} sa merenim vrednostima datih promenljivih. Test je pozitivan, pa se dolazi do zaključka da je u skupu merenja V_{7001} , P_{7001} , Q_{7001} neko od merenja sumnjivo.

7. ZAKLJUČAK

U radu je objašnjeno koliko su bitne aproksimacije u modelovanju prenosne mreže. U primeni raznih aproksimacija koje su objašnjene ponaosob jasno se može videti koliko one same pojednostavljaju i ubrzavaju proračun.

Pri svemu tome, model se uopštava ali ne gubi na svojoj suštini. Poseban akcenat je dat i validacijama koje je potrebno uvesti da bi se kreirao što kvalitetniji model. Zaključak je da najveći problem u kreiranju kvalitetnog modela mreže predstavlja kvalitet podataka koji se dobija od klijenta.

8. LITERATURA

- [1] Vladimir C. Strezoski: Osnovi elektroenergetike, FTN Novi Sad, 1996.
- [2] Harald G. Svendsen: *Grid model reduction for large scale renewable energy integration analyses*, SINTEF Energy Research, Trondheim, 2015.
- [3] A. Monticelli, „State estimation in electric power systems, a generalized approach“, University of Campinas, Norwell, 1999.

Kratka biografija:

Bojan Kuzmić je rođen u Doboju 1989. godine. Master rad je odbranio 2018. godine na Fakultetu tehničkih nauka iz Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi.

Vladan Krsman rođen je u Sarajevu 1985. godine. Doktorsku disertaciju odbranio je 2017. godine na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektroenergetskih sistema.