

Softverski alat za proračun tokova snaga i naponskih prilika u distributivnim sistemima

Milan Ivanović¹

¹ Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Koste Glavinića 8a
11000 Beograd, Srbija
mivanovic@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu je dat opis softverskog alata razvijenog za potrebe analize rada distributivnih sistema. Grafički korisnički interfejs podržava modelovanje distributivnih sistema u geografskom okruženju, zbog potrebe za sagledavanjem prostorne raspodele njegovih elemenata. Posebna pažnja posvećena je modelu potrošnje koji je formiran tako da se jednom čvoru može pridružiti proizvoljan broj grupa potrošača sa različitim statickim koeficijentima samoregulacije snage po naponu. Ovo je posebno važno kada se ima u vidu mogućnost korišćenja arhivskih podataka iz SCADA sistema, koji su već sada, u manjoj ili većoj meri, zastupljeni u svim elektrodistributivnim preduzećima u Srbiji. Tome treba dodati i smart grid koncept koji će, između ostalog, znatno povećati kvantitet i kvalitet merenja. Za potrebe analiza naponsko - reaktivnih stanja u distributivnoj mreži, predviđena je i mogućnost modelovanja linearizovane grane magnećenja transformatora.

Ključne reči: distributivna mreža, geografski informacioni sistem, naponsko - reaktivna stanja

1. Uvod

Imajući u vidu proces deregulacije elektroprivrednih preduzeća, otvaranje tržišta električne energije i sve aktuelnije teme energetske efikasnosti i kvaliteta isporučene električne energije, jasno je da uloga distributivnih preduzeća postaje znatno složenija. Značaj analize distributivnih mreža u opisanim uslovima ne treba posebno isticati. Ipak, čini se da praktična primena metoda za analizu nije zastupljena u dovoljnoj meri.

Suštinu svih analiza elektroenergetskih sistema čine proračuni tokova snaga. Za potrebe analiza prenosnih mreža razvijen je veliki broj metoda. Međutim, njihova direktna primena na distributivne sisteme se pokazala kao nepraktična, usled poteškoća u pogledu konvergencije. Slabo upetljana stru-

ktura distributivnih mreža rezultuje retkim matricama incidencije, zbog čega je moguć prelazak sa matričnih na vektorske strukture. Redukcija dimenzija modela se povoljno odražava na brzinu i stabilnost proračuna. Distributivne mreže odlikuje i veliki broj čvorova (nekoliko hiljada) i velika geografska rasprostranjenost.

Poslednjih godina je razvijen veliki broj metoda za proračun tokova snaga i naponskih prilika u distributivnim mrežama. Među njima se posebno ističe kompenzacioni metod [1] čiju implementaciju odlikuje brz i stabilan proračun uz relativno skromne zahteve u pogledu potrebnih memorijskih resursa. Za potrebe analize rada distributivnih sistema razvijen je softverski alat *DistFlow* čiju osnovu čini pomenuti kompenzacioni metod. Grafički korisnički interfejs podržava modelovanje distributivnih sistema u geografskom okruženju, tako da softverski alat može da se podvede pod kategoriju geografskih informacionih sistema. Da bi se olakšao unos podataka pri modelovanju mreže, predviđena je mogućnost rada sa georeferenciranim grafičkim podlogama (ortofoto snimci, geografske, topografske i katastarske karte i sl.).

Unos vodova i transformatora je realizovan preko interne baze podataka, koju je moguće uređivati u toku rada. Pored toga, moguće je modelovanje baterija za kompenzaciju reaktivne energije, generisanja aktivne i reaktivne snage u svim čvorovima modelovane mreže. Posebna pažnja posvećena je modelovanju potrošnje [2]. Model potrošnje je formiran tako da se čvoru može pridružiti proizvoljan broj grupa potrošnje sa različitim statickim koeficijentima samoregulacije aktivne i reaktivne snage po naponu. Tome treba dodati i mogućnost modelovanja linearizovane grane magnećenja transformatora, što rezultira znatno kvalitetnijim rezultatima analiza naponsko - reaktivnih stanja u distributivnoj mreži.

2. Proračun tokova snaga i naponskih prilika u mreži

Model, u opštem slučaju, predstavlja sistem prepostavki, podataka i zaključivanja. Pod modelovanjem se podrazumeva proces dostizanja odgovarajućeg sistema prepostavki, podataka i zaključivanja [3]. Proračun tokova snaga i naponskih prilika se svodi na proračun fazora napona u čvorovima elektroenergetske mreže u stacionarnom stanju sa sinusoidalnom pobudom, pri čemu su konfiguracija i parametri poznati. Proračun se izvodi pod pretpostavkom da je trofazna elektroenergetska mreža uravnotežena, odnosno, da se može predstaviti ekvivalentnom monofaznom mrežom. Posle određivanja fazora napona u čvorovima mreže pristupa se proračunu tokova i gubitaka aktivnih i reaktivnih snaga.

Ulazne veličine modela distributivne mreže za proračun tokova snaga su topologija mreže, parametri električnih veza, modeli potrošnje i generatora. Rezultat simulacije su moduli i fazni stavovi napona svih čvorova u mreži. Po obavljenom proračunu pristupa se određivanju sledećih veličina:

- tokovi snaga po svim elementima mreže,
- gubici snage po svim elementima mreže,
- injektiranje aktivne i reaktivne snage u balansnom čvoru,
- ukupni gubici snage u mreži i
- iznos opterećenja po čvorovima za naponske prilike u mreži.

2.1. Parametri čvorova

Za potrebe proračuna, svim čvorovima analizirane mreže se pridružuje šifra (primarni ključ) i nominalni napon. Navedene veličine se direktno koriste u proračunu tokova snaga. Pored toga, svim čvorovima se pridružuju naziv i geografske koordinate. Čvorovi su podeljeni u dve grupe.

Prvu grupu čine račvanja. Ova grupa čvorova je u potpunosti određena gore navedenim veličinama. Račvanje se u modelu mreže koristi kao topološka odrednica (za čvorista u kojima se mreža grana).

Druga grupa obuhvata regulacione (PV) i potrošačke (PQ) čvorove. Modelovanje regulacionih čvorova zahteva unos sledećih podataka:

- generisanje aktivne snage, P_{gen}
- napon na generatorskim sabirnicama, U_{gen}
- minimalno i maksimalno generisanje reaktivne snage, Q_{min} i Q_{max}

Potrošački čvorovi su predstavljeni preko statičkog eksponencijalnog modela koji uvažava koeficijente samoregulacije aktivne i reaktivne snage po naponu (koeficijenti samoregulacije po frekvenciji su zanemareni):

$$P_i = P_{n,i} \left(\frac{U}{U_n} \right)^{k_{pu,i}}, \quad Q_i = Q_{n,i} \left(\frac{U}{U_n} \right)^{k_{qu,i}}. \quad (1)$$

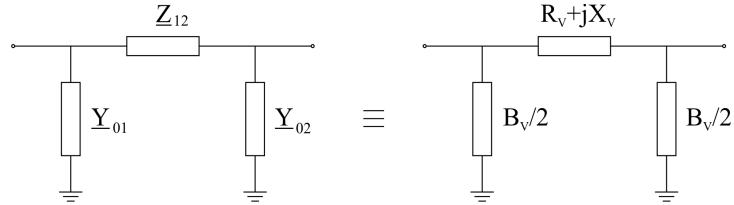
gde je

- P_i, Q_i - aktivna i reaktivna snaga potrošnje pri naponu U
 $P_{n,i}, Q_{n,i}$ - aktivna i reaktivna snaga potrošnje pri nominalnom naponu U_n
 $k_{pu,i}, k_{qu,i}$ - koeficijenti samoregulacije aktivne i reaktivne snage po naponu

Svim potrošačkim čvorovima se može pridružiti proizvoljan broj grupa potrošnje sa različitim karakteristikama.

2.2. Parametri nadzemnih vodova i kablova

Vodovi i kablovi su, za potrebe proračuna, predstavljeni svojim simetričnim π ekvivalentima, kao što je prikazano na slici 1. Konduktanse otočnih grana vodova se zanemaruju ($G_{01}, G_{02} \approx 0$), tako da u otočnim granama π ekvivalenta figuriraju samo susceptanse ($Y_{01} = Y_{02} = B_v / 2$).



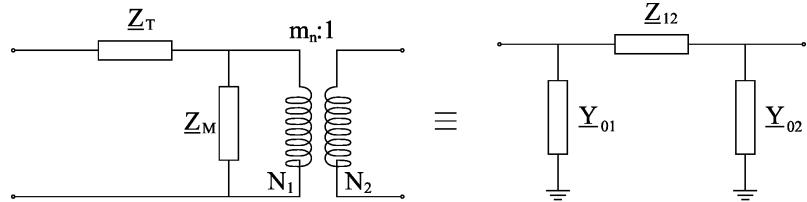
Slika 1. Simetrični π ekvivalent voda

2.3. Parametri dvonamotajnih regulacionih transformatora

Regulacioni transformatori imaju promenljiv broj zavojsaka na jednom od namotaja (obično na strani višeg napona), a samim tim i promenljiv odnos transformacije:

$$\underline{m} = \underline{m}_n a, \quad a = 1 + n\Delta a. \quad (2)$$

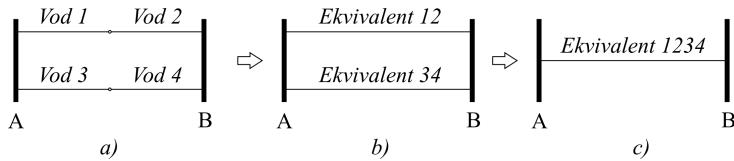
gde je sa a označen nenominalni odnos transformacije koji se menja u koracima $\Delta a = 1.25\%$ ili 1.5% u ukupnom opsegu od $\pm 5\%$ ili $\pm(15 \div 18\%)$.



Slika 2. Zamenska šema ragulacionog transformatora sa granom magnećenja i odgovarajući π ekvivalent

2.4. Formiranje primitivnog grafa mreže

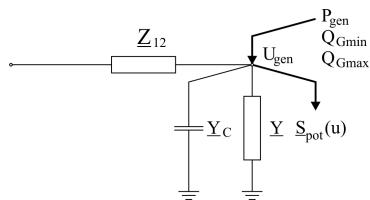
Pre početka proračuna neophodno je formirati primitivni graf mreže. Grane primitivnog grafa mreže predstavljaju topološke veze između dva čvora. Veza dva čvora može biti nehomogena (redna veza vodova) i / ili višestruka. Na slici 3 je prikazan najopštiji slučaj nehomogene višestruke veze čvorova A i B i redosled formiranja prostijih ekvivalenata. Najopštija predstava modela mreže prikazana je na slici 3 a i služi za čuvanje podataka o elementima mreže, uklopnom stanju i povezanosti. Sve izmene u mreži se ažuriraju u ovoj formi.



Slika 3. Svođenje višestruke nehomogene veze na prostu vezu

2.5. Numeracija čvorova

Algoritam proračuna primenom kompenzacione metode je veoma jednostavan budući da je baziran na direktnoj primeni 1. i 2. Grane grafa predstavljaju elemente mreže. U korenu stabla mreže nalazi se balansni čvor sistema. Kompenzacioni metoda zahteva numeraciju čvorova i grana. U softverskom alatu DistFlow, čvorovi su numerisani po ogranicima.



Slika 4. Opšti slučaj Γ ekvivalenata

Očigledno je da se, u slučaju radikalnih mreža, numeracija čvorova jednoznačno odnosi i na "napojne" grane svakog od čvorova. Stoga se cela modelovana mreža može predstaviti preko Γ ekvivalenata, sačinjenih od čvora i njegove napojne grane, kao što je prikazano na slici 4.

2.6. Kompenzacioni metod za proračun tokova snaga i naponskih prilika

Kao i većina metoda, i ovo je iterativni metod. Sa unapred zadatom vrednošću napona u balansnom čvoru, uz pretpostavku da su, u prvoj iteraciji, naponi svih čvorova u mreži jednaki naponu izvornog čvora, iterativni proces se sastoji iz tri koraka:

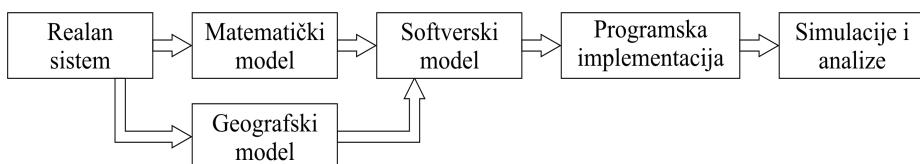
1. proračun injektirane struje čvorova sa naponima iz prethodne iteracije
2. korak unazad: proračun ukupne struje čvorova (suma struja grana)
3. korak unapred: proračun napona čvorova

U praksi se za zaustavljanje proračuna koriste kriterijumi koji tretiraju maksimalnu razliku snaga ili modula napona u dve uzastopne iteracije. Zbog uvažavanja statičkih karakteristika potrošnje, kao kriterijum za zaustavljanje proračuna koristi se maksimalna razlika napona.

3. Opis softverskog alata *DistFlow*

3.1. Softverski model i razvoj softverskog alata

Softverski model koji je korišćen pri izradi aplikacije *DistFlow* objedinjuje matematički i geografski model elemenata mreže. Za opis elemenata modela korišćeni su korisnički definisani tipovi (engl. User Defined Type) koji su deklarisani u standardnim modulima kao javne varijable. Ovako definisani tipovi su, korišćenjem dinamičkih nizova, organizovani u vektorske strukture, koje predstavljaju osnovne elemente softverskog modela aplikacije [4].



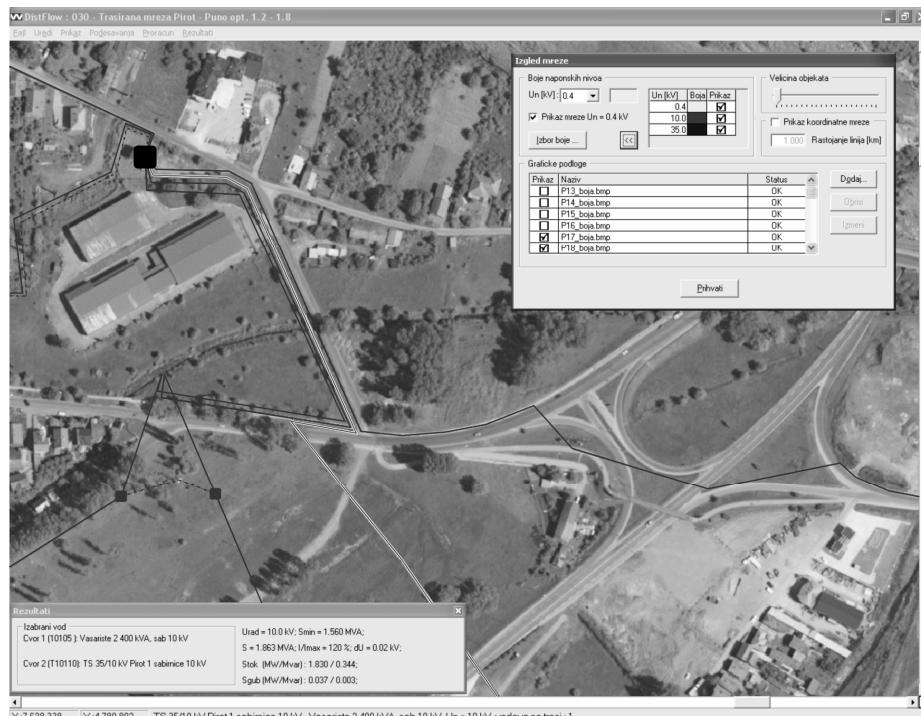
Slika 5. Softverki model aplikacije *DistFlow*

Za razvoj softverskog alata *DistFlow* korišćen je program *Visual Basic 6.0, Enterprise edition*. Odrednica Visual (vidni, vizuelni) ukazuje na metodu korišćenu za stvaranje grafičkog korisničkog interfejsa. Radno okruženje *Visual Basica* se često naziva integrisano razvojno okruženje jer objedinjuje različite funkcije kao što su oblikovanje, uređivanje, prevođenje i ispravljanje grešaka [5], [6].

3.2. Ulazni fajlovi

Ulazni fajlovi sadrže: zaglavje, konfiguracione parametre, korisnički zadate parametre okruženja, podatke o elementima mreže i podatke o topologiji mreže. Fajlovi su organizovani kao tekstualne datoteke sa sekvencijalnim pristupom. Podaci o elementima mreže i podaci o topologiji mreže smeštaju se u vektorske strukture. Ovakva organizacija podataka pruža dodatnu mogućnost izmene parametara mreže pomoću teksta editora.

3.3. Grafički korisnički interfejs

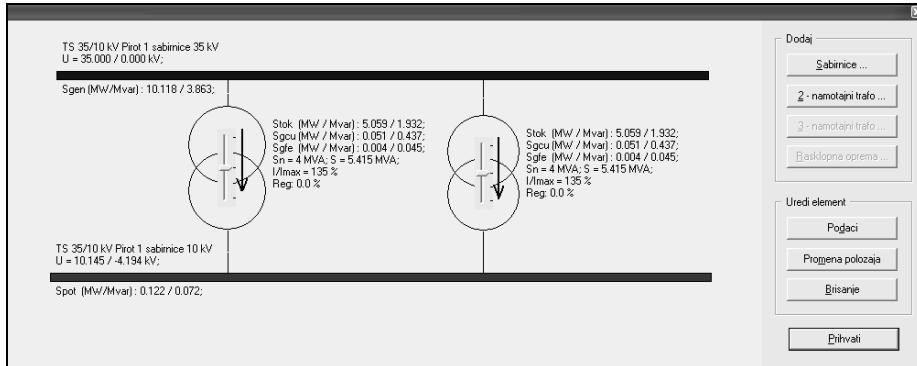


Slika 6. Radna površina softverskog alata DistFlow sa prikazom dela mreže koji se napaja iz TS 35/10 kV

Na slici 6 je prikazana radna površina softverskog alata *DistFlow* sa modelovanom realnom distributivnom mrežom. Čvorovi mreže su predstavljeni kvadratima čija veličina zavisi od vrste čvora (račvanje, čvor sa opterećenjem ili transformatorska stanica). Vodovi su predstavljeni linijama. Boja voda zavisi od naponskog nivoa voda. Vrsta linije (puna ili isprekidana) ukazuje na uklopljeno stanje voda. Moguće je prikaz trasa vodova i topoloških veza čvorova.

Linija menija sadrži naredbe za manipulaciju fajlovima, uređivanje elemenata mreže, manipulaciju prikazom slike, podešavanje prikaza, podešavanje parametara proračuna i prikaz rezultata. Prva dva polja statusne linije (u dnu radne površine) služe za prikaz geografskih koordinata pokazivača miša a treće polje za prikaz instrukcija, obaveštenja i upozorenja.

U donjem levom uglu se nalazi prozor za prikaz parametara izabranog elementa. Položaj i vidljivost ovog prozora definiše korisnik. U gornjem desnom uglu je prikazan prozor za podešavanje izgleda slike: boje naponskih nivoa, vidljivost naponskih nivoa, veličina prikazanih objekata, prikaz koordinatne mreže i manipulacija grafičkim podlogama.



Slika 7. Izgled prozora za uređivanje transformatorske stanice

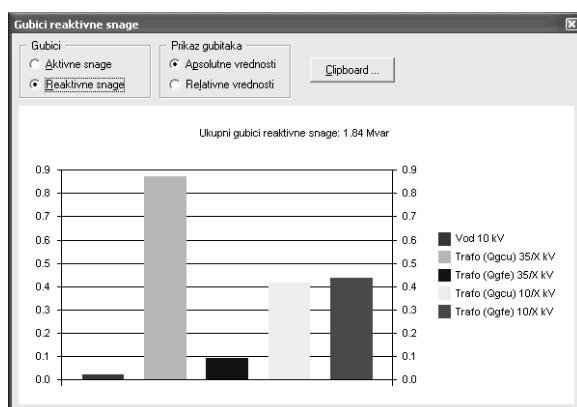
Na slici 7 je prikazan prozor za uređivanje transformatorske stanice koji služi za modelovanje elemenata njenih elementa (sabirnice, transformatori i rasklopna oprema) i za prikaz naponskih prilika, tokova snaga i gubitaka posle obavljenog proračuna. Na slici 8 su prikazani obrasci za uređivanje čvorova (a) i vodova (b). Na slici 9 je prikazan prozor za zadavanje parametara proračuna: izbor balansnog čvora, napon balansnog čvora, kriterijum za zaustavljanje proračuna, maksimalni broj iteracija, naponska ograničenja, uvažavanje grane magnećenja transformatora i specifikacija napona pri kome se prelazi na Z model potrošnje.

Slika 8. Izgled prozora za uređivanje transformatorske stanice

Slika 9. Izgled prozora za zadavanje parametara proračuna

3.4. Prikaz rezultata proračuna

Vrednosti napona, tokova snaga i gubitaka se, posle proračuna, prikazuju na radnoj površini (u okviru posebnog prozora, kao što je prikazano na slici 6). Rezultate svih proračuna je moguće izvesti u Excel. Postoji i mogućnost prikaza gubitaka po elementima i naponskim nivoima (slika 10).



Slika 10. Prikaz gubitaka po elementima i naponskim nivoima

4. Zaključak

U radu je opisan razvoj softverskog alata DistFlow za proračun tokova snaga i naponskih prilika u distributivnim mrežama. Aplikacija je zasnovana na grafičkom interfejsu i podržava rad u geografskom okruženju i rad sa geo-referenciranim grafičkim podlogama za lakši unos objekata distributivne mreže i trasa vodova.

Za proračun tokova snaga i naponskih prilika primjenjen je kompenzacioni metod koji se ističe brzinom rada i smanjenim memorijskim potrebama. Baze podataka sa parametrima vodova i transformatora smeštene su u posebne strukture. Pritom su podržane sve operacije vezane za ažuriranje sadržaja baze podataka. Rezultati proračuna se prikazuju u okviru grafičkog interfejsa i u Excel tabelama. Rezultati proračuna ukazuju na kritične elemente mreže se stanovišta naponskih prilika, gubitaka i strujnog opterećenja.

Aplikacija je prilagođena mogućnostima personalnih računara i savremenih operativnih sistema. Koncipirana je tako da može da se nadogradi implementacijom metoda za optimalno ukloplno stanje, optimalnu regulaciju napona, optimalne lokacije uređaja za kompenzaciju reaktivne snage i sl. Poslednjih godina je aktuelna problematika priključenja malih elektrana na distributivnu mrežu. U skladu s tim, planirano je proširenje razvijene aplikacije za potrebe provere kriterijuma dozvoljene snaga male elektrane.

Literatura

- [1] D. Shirmoharmadi, H. W. Hong, A. Semlyen: "A compensation based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, No. 2 (1988)
- [2] Lidija M. Korunović: "Modelovanje potrošnje srednjenačinske distributivne mreže na osnovu eksperimenata", doktorska disertacija, Elektronski fakultet, Niš (2008)
- [3] Zlatan Stojković: "Projektovanje pomoću računara u elektroenergetici – primena programskih alata", monografija, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Akademска misao, Beograd (2009)
- [4] Milo Tomašević: "Strukture podataka", Akademска misao, Beograd (2005)
- [5] Eric A. Smith, Valor Whisler, Hank Marquis: "Visual Basic 6 Biblija", Mikroknjiga, Beograd (1999)
- [6] Jason Bock: "Visual Basic 6.0 Win32 API Tutorial", Wrox press, Birmingham (1998)

Abstract. This paper describes a software tool developed for the analysis of distribution systems. Graphical user interface supports modeling of distribution systems in the geographical environment, because of the importance of the constellation of its elements. Special attention is given to the model of consumption which allows modeling of consumer groups with different static characteristics. This is very important from the aspect of using archival data from SCADA systems, which are present in all power distribution companies in Serbia. Smart grid concept will also significantly increase the quantity and quality of the measurements. For purposes of analysis of the voltage - reactive states in the distribution network, the linearized magnetization branch of the transformer was modeled.

Keywords: distributive network, geographic information system, voltage - reactive states

Software Tool for Load Flow and Voltage Calculations in Distribution Systems

Rad primljen u uredništvo 22.11.2010. godine
Rad prihvaćen 29.11.2010. godine