



OPTIMIZACIJA AUTOMATSKOG PODFREKVENTNOG RASTEREĆENJA
POTROŠAČA PRIMENOM GENETSKOG ALGORITMA
OPTIMIZATION OF UNDERFREQUENCY LOAD SHEDDING USING GENETIC
ALGORITHM

Zoltan Berec, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratka sadržaj – U ovom radu predstaviće se rešenje optimizacije Automatskog podfrekventnog rasterećenja potrošača (AFRP) primenom genetskog algoritma. Opisaćće se realizacija AFRP-a ILS metodom (Intelligent Load Shedding) koja se koriste za očuvanje stabilnosti kao krajnje opcije i kao rešenje je ponuđen Genetski algoritam kao metod optimizacije za pronalaženje adekvatne liste potrošača za isključenje.

Ključne reči: Stabilnost elektroenergetskog sistema, Genetski algoritam, automatsko podfrekventno rasterećenja potrošača

Abstract – This paper represents solution for optimizing Underfrequency Load Shedding (UFLS) in power electric systems using Genetic Algorithm. Through this paper ILS (Intelligent Load Shedding) metod will be described as solutions for preservation of stability in power systems as last option and for solution will propose Genetic algorithm as a metod of optimization for UFLS in finding the best suited list of consumers to curtail.

Key words: Power system stability, Underfrequency Load Shedding, Genetic Algorithm

1. UVOD

Razvojem industrije i njene infrastrukture naglasila se potreba za povećanom potrošnjom električne energije. Nesrazmerna u velikom rastu opterećenja s jedne strane, i značajno manjem rastu proizvodnih i prenosnih kapaciteta s druge strane, dovelo je do potrebe za pojačanim iskorištenjem postojećih kapaciteta. Prenos velike količine energije kroz mrežu dovodi do rada prenosnih linija blizu njihovih limita. Zbog ovih razloga sistemi napajanja postaju podložni smetnjama i ispadima sistema. Neke smetnje koje se iskuse elektroenergetskim sistemima su greške zbog opreme, gubitak generatora, iznenadna promena potrošnje... Ove smetnje se menjaju po intenzitetu. U nekim trenucima ove smetnje mogu da utiču na sistem da bude nestabilan. Veliki deficit snage u sistemu sa proizvodnjom nedovoljnom da pokrije potrošnju mogu da dovedu do potpunog frekventnog i naponskog sloma odnosno raspada sistema. Kada proizvodni kapaciteti rade na svojim gornjim granicama i kada ne postoji mogućnost za pokrivanje deficita, potrebno je primeniti dodatne akcije, a u cilju sprečavanja opadanja frekvencije i frekventnog sloma.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Platon Sovilj.

U toku vanrednog stanja elektroenergetskog sistema potrebno je vršiti rasterećenje mreže isključivanjem pojedinih manje bitnih potrošača kako bi omogućili snabdevanje potrošača kao poslednji korak očuvanja sistemskog integriteta.

Rasterećenje mreže automatskim podfrekventnim rasterećenjem potrošača - AFRP jedna je od efektivnijih metoda koja očuvava stabilnost elektroenergetskog sistema u kritičnim vremenima i uspostavlja ravnotežu aktivnih snaga u sistemu.

2. Automatsko podfrekventno rasterećenje potrošača

Veoma je važno da elektroenergetski sistem (ESS) osigura dovoljnu generaciju snage kako bi mogle da zadovolje sve potrošače kako u normalnoj fazi rada sistema tako i u kritičnim fazama. U normalnim uslovima EES se održava u balansu generišući snagu dovoljnu da nadomesti sve gubitke i napoji sve potrošače.

$$\text{Proizvodnja} = \text{Potražnja} + \text{Gubici}$$

Pod balansiranim stanjem sistem će funkcionisati pod sinhronom frekvencijom od 50 Hz. Frekvencija u EES-u se menja kroz sledeću tabelu:

Tabela 1. Promena frekvencije u zavisnosti od opterećenja mreže

Stanje EES	Promena frekvencije u sistemu
Proizvodnja > Potražnja + Gubici	Povećanje
Proizvodnja = Potražnja + Gubici	Nema promene
Proizvodnja < Potražnja + Gubici	Smanjenje

2.1. Posledice od prekomerne devijacije učestanosti

Devijacije frekvencije u sistemu moraju biti otklonjene inače rad sistema nije moguć. Proizvodne jedinice i transformatori imaju ugrađene zaštitne frekvencione releje koji ih štite od povećane ili smanjene frekvencije. Generatorske turbine nisu u stanju da podnesu velike smetnje. U slučaju prekoračenja, zaštita se uključuje, isključujući proizvodnju i povećavajući deficit snage.

Posledice povećanja učestanosti na generatorima

Ako frekvencija poraste, generatori osećaju promenu kao gubitak potrošača. Posledično oni će početi da rotiraju brže i primarna regulacija će se uključiti, što će smanjiti mehaničku snagu turbine, posle toga će se frekvencija stabilizovati u stacionarno stanje i generatori mogu normalno da funkcionišu. Ovo predstavlja problem zbog

povećanja napona usled gubitka potrošača. U ovom slučaju generator će biti isključen sa mreže.

Posledice redukovanja učestanosti generatora

U slučaju da su generatori preopterećeni, brzina hlađenja sistema je ispod normalnih vrednosti. Napon opada, regulator povećava jednosmernu pobudu rotora, ovo predstavlja rizik opterećenja rotora i statora.

Dozvoljeno vremensko prekoračenje može se izračunati kroz sledeću jednačinu:

$$t = \frac{K}{(x^2 - 1)}$$

gde K predstavlja konstantu koja ima 2 različite vrednosti: 44 je za vremensko opterećenje statora a 33 za rotor; x predstavlja vrednost p.u struje statora ili napona.

Iako većina uređaja može izdržati malo odstupanje frekvencije, jačina i dužina devijacije je strogo ograničena posebno za skupe jedinice kao što su sinhroni generatori. Generatorske turbine su osetljive na rad prilikom odstupanja frekvencije od nominalnih vrednosti, abnormalne frekventne operacije zbog prekomernih vibracija mogu dovesti do istrošenosti i ubrzanog starenja. Prema istraživanjima maksimalno vreme rada parnih turbina prilikom devijacije frekvencije je predstavljen kroz tabelu 2.

Tabela 2. Radna sposobnost parne turbine pri devijaciji frekvencije

Devijacija frekvencije pod punim opterećenjem	Maksimalno vreme rada
$\Delta f = 1\%f_n$	Neprekidno
$\Delta f = 2\%f_n$	100 minuta
$\Delta f = 3\%f_n$	10 minuta
$\Delta f = 4\%f_n$	1 minut
$\Delta f = 5\%f_n$	0.1 minut
$\Delta f = 6\%f_n$	1 sekund

Pomoćni uređaji elektrane kao što su indukcijske mašine u sistemu hlađenja se oslanjaju na stabilnu frekvenciju. Niža frekvencija dovodi do manje brzine rotacije i manje efikasne ventilacije.

2.2. Osnovne funkcije automatskog podfrekventnog rasterećenja potrošača

Svrha ovih korektivnih akcija jeste da se narušeni sistem prinudno vrati u novo stanje ravnoteže, balansiranjem proizvodnje i potrošnje, dakle, održavanjem frekvencije u dozvoljenom opsegu. Ukupnu snagu rasterećenja, je potrebno za različite vrednosti manjka proizvodnje, optimalno rasporediti po stepenima, za svaki stepen karakteriše učestanost na kojoj se okida, količina opterećenja i vremenska razlika između svakog koraka. Konačni cilj je da se izvrši optimalno rasterećenje potrošača za minimalnu potrebnu snagu rasterećenja, a u isto vreme uspostavi brza, mirna i sigurna tranzicija sistema od vanrednog do normalnog stanja.

AFRP mora da ispuni sledeće relevantne funkcije:

- Frekventni odziv nakon poremećaja mora biti kvalitetan, a što podrazumeva brz oporavak frekvencije na vrednost blisku nominalnoj, uz što manje rasterećenje i što manji pad frekvencije ispod nominalne (minimalna vrednost ne sme da pređe 47 Hz).
- Porast frekvencije iznad nominalne treba da je što manji (maksimalna dozvoljena frekvencija ne sme da pređe 51 Hz).

- Potrebno je ostvariti koordinaciju sa podfrekventnom zaštitom generatora.
- Potrebno je uzeti u obzir kategorije potrošača tj. njihove prioritete.
- Potrebno je izbeći nepotrebno isključenje potrošača.

Kompjutersko rešenje je potrebno kako bi se izračunala minimalna potrebna snaga rasterećenja, broj stepeni AFRP, operaciono vreme i snaga rasterećenja za svaki od stepena. Postoji mnogo tipova i rešenja za ove probleme kroz literaturu, ali generalno, može se podeliti u statičke i dinamičke (ili adaptivne) šeme za rasterećenje mreže.

2.3. Mane konvencionalnih APRP šema

Iako konvencionalne APRP šeme imaju široku implementaciju u elektroenergetskim sistemima imaju nekoliko glavnih nedostataka:

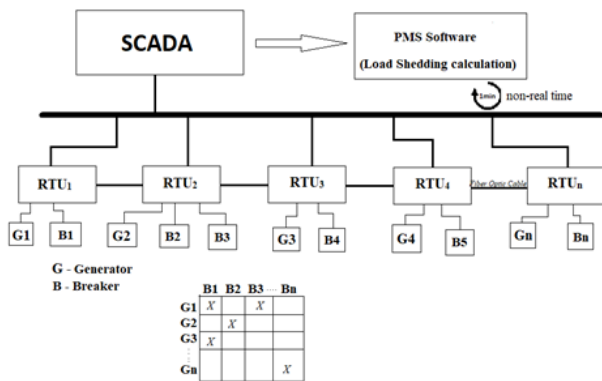
- I Ne uzimaju u obzir dinamičko ponašanje opterećenja elektroenergetskog sistema.
- II Ne uzimaju u obzir lokaciju poremećaja prilikom rasterećenja mreže.
- III Fiksno određen procenat rasterećenja po stepenu ne može se dinamički prilagoditi debalansu snage, što može da dovede do nepreciznog rasterećenja.

Razvojem kompjuterizovanih sistema koji vrše upravljanje elektroenergetskim sistemima, zbog mana konvencionalnih metoda rasterećenja mreža, stvara se mogućnost zamene novim bržim i boljim metodama (ILS- Inteligent Load Shedding).

3. REALIZACIJA AUTOMATSKOG PODFREKVENTNOG RASTEREĆENJA POTROŠAČA ILS METODOM

Razvojem i modernizacijom kompjuterizovanih sistema za upravljanje elektroenergetskih sistema (*Power Management Systems -PMS*) imamo mogućnost za brzo i optimalno upravljanje potrošačima u aktuelnim operacionim uslovima rada sa znanjem o svim prethodnim smetnjama. PMS predstavlja sistem koji u realnom vremenu vrši akviziciju podataka i merenja sa terena i kontinualno ažuriraju kompjuterski model sistema. Jedna od funkcija koju obavlja PMS predstavlja i funkcija rasterećenja mreže (*Load Shedding (LS) function*). Funkciju koristimo za primenu metode pametnog rasterećenja mreže (*ILS*), gde funkcija za sve unapred definisane scenarije vandrednih situacija vrši skladištenje liste potrošača za rasterećenje na RTU ili PLC uređajima. Kada RTU ili PLC uređaj dobije signal koji opisuje određeno vandredno stanje šalje se komanda za isključenje potrošača iz mreže. Na ovaj način omogućujemo veoma brzo delovanje sistema za različite vandredne situacije.

PMS ima sve informacije o potrošačima kao i topologiji mreže. Kroz funkciju rasterećenja mreže vršimo proračun i odabir potrošača za rasterećenje prema prioritetu, statusu i količini potrošnje. Svi proračuni se vrše u ne-realnom vremenu, uzima se trenutak kad se pravi presek stanja i odabir potrošača se vrši za dato trenutno stanje mreže. Svaka lista potrošača se čuva u tabelama na RTU/PLC uređajima po tipu definisanih scenarija. Ova tabela se ažurira nakon svakih 60s, i nakon svakog rasterećenja mreže. Na ovaj način u slučaju neočekivanih ispada sistema RTU/PLC reaguje odmah, bez potrebe za komunikacijom ka PMS-u, i tako čuva elektroenergetski sistem od totalnog raspada u roku od 100ms.



Slika 1. Realizacija automatskog rasterećenja mreže ILS metodom

Rasterećenje mreže vršimo kroz sledeće scenarije:

1. Kvara (ispada) generatora
2. Opadanja sistemske frekvencije ispod određenog limita

Kada imamo kvar (ispad) generatora u mreži ne čekamo da sistem reaguje na promene već odmah delujemo rasterećenjem sistema. Sistemska arhitektura je tako osmišljena da može da se reaguje skoro u istom trenutku od događaja kvara.

Rasterećenje mreže se vrši i kada frekvencija opadne ispod određenog limita. Operator mreže bira broj stepeni rasterećenja i zadaje procentualno količinu rasterećenja za svaki od stepena rasterećenja. PMS konstantno vrši merenja i proveru frekvencije u sistemu i kada frekvencija opadne ispod određenog limita vrši se rasterećenje po prvom stepenu. Nakon toga vrše se ponovni proračuni PMS-a i ako su potrebni sledeći stepeni rasterećenja će biti izvršeni. Za sve moguće predviđene scenarije potrošači se uvek biraju po prioritetu i količini potrebne snage za rasterećenje. Potrošači sa većim prioritetom se uvek biraju poslednji za isključenje.

3.1. Potreba za optimizacijom ILS metode

Stanje električne mreže se stalno menja zbog promene konfiguracije i opterećenja mreže. Zbog stalnih promena, kroz proračun funkcije moraju stalno da se ažuriraju tabele na PLC/RTU uređajima, zbog čega se funkcija poziva veoma često. Kada imamo mali sistem od po nekoliko potrošača sa jednim ili dva generatora lako je izvršiti proračun i odabir potrošača za sve od mogućih scenarija ispada. Za PMS koji upravlja velikim sistemima gde imamo veliki broj potrošača i veći broj generatora ova funkcionalnost mora da se izvršava jednako brzo. Zbog čestih poziva funkcije bitno je obratiti pažnju na vremensko trajanje proračuna. Takođe ukupna snaga rasterećenja odabrane kombinacije potrošača mora da bude jednaka ili veća od potrebne snage za rasterećenje. Funkcija koja vrši odabir potrošača za rasterećenje mora biti veoma brza zbog stalnih poziva i mora da daje optimalno rešenje za dati problem uz određene kriterijume koje mora da ispuni. Kako bi rešili problem brzine traženja određene kombinacije potrošača za rasterećenje primenjen je genetski algoritam koji služi kao tehnika optimizacije i traženja adekvatnog rešenja.

4. GENETSKI ALGORITAM

Genetski algoritam (GA) predstavlja tehniku optimizacije i pretraživanja baziranu na principima genetike i prirodne selekcije. U genetskom algoritmu imamo populaciju mogućih rešenja za dati problem. Ova populacija rešenja prolazi kroz rekombinaciju i mutaciju (kao u genetici), kreirajući nova rešenja i proces se ponavlja kroz određen broj generacija. Za svako rešenje je dodeljena fitnes vrednost (sposobnost rešenja – opisuje koliko je rešenje dobro) koja se određuje kroz funkciju za dati problem. Rešenja koja imaju najveću fitnes vrednost imaju najveće šanse da učestvuju u kreiranju novih rešenja (odnosno najmanju fitnes vrednost od zavisnosti od postavke problema).

Implementacija genetskog algoritma se vrši kroz sledeće korake [4]:

1. Kreiranje inicijalne populacije
2. Evaluacija sposobnosti svakog pojedinca unutar populacije (*Fitness evaluation*)
3. Primena genetskih operatora

Genetski operatori menjaju genetski sastav potomaka.

Predstavljaju ih sledeće procedure i funkcije:

- Selekcija najспособnijih pojedinaca za parenje (*Selection*)
- Rekombinacija izabranih pojedinaca za kreiranje njihovih naslednika-potomaka (*Crossover*)
- Mutacija (*Mutation*) – Mutacija gena
- Dodavanje novih potomaka u populaciju
- Selekcija najboljih u populaciji

U C# programskom jeziku napisana je GA funkcija kao rešenje problema optimizacije za potragu adekvatne liste potrošača. Kako PMS ima sve informacije o sistemu za ulazne parametre genetskog algoritma prosleđuje listu svih trenutno aktivnih potrošača u mreži i željenu snagu rasterećenja za određeni scenario. Potrošači su opisani statusom, opterećenjem (potrošnja izražena u MW) i prioritetom. Ovi ulazni parametri prolaze kroz proces genetskog algoritma i kao izlaz daju najbolje proračunato rešenje, tj listu potrošača za rasterećenje.

Pseudo kod koji opisuje genetski algoritam predstavljen je na sledećoj slici:

```
GA()
  initialize population
  find fitness of population

  while (termination criteria is reached) do
    parent selection
    crossover with probability pc
    mutation with probability pm
    decode and fitness calculation
    survivor selection
    find best
  return best
```

Slika 1 Pseudo kod GA

5. TESTIRANJE NAPISANE GA FUNKCIJE

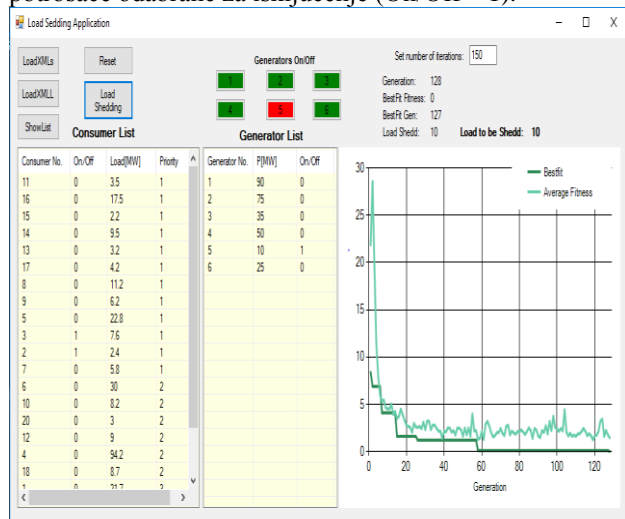
Za potrebe testiranja napisana je aplikacija u kojoj se nalazi i funkcija odabira potrošača za rasterećenje. Aplikacija je pisana u C# programskom jeziku i sačinjena

od UI prozora pomoću kojeg možemo da vidimo rezultate rada osmišljene GA funkcije.

Napravljena su dva statička modela od po 6 generatora i 18 potrošača, odnosno 18 generatora i 48 potrošača. UI aplikacija nudi odabir jednog od dva ponuđena modela. Svaki od modela nudi odabir scenarija, to jest mogućnost uključivanja i isključivanja željenog broja generatora za odabrani model.

Kako za očekivane scenarije očekujemo ispad jednog generatora sledeći primeri testiranja biće bazirani na jednom ispadu generatora.

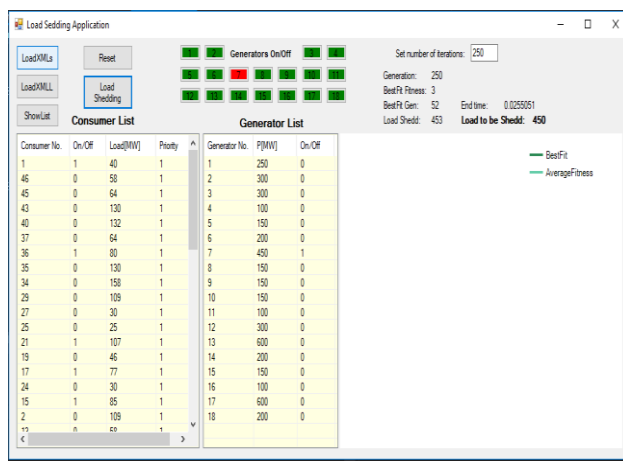
Test 1 - Biramo model od 6 generatora i 18 potrošača. Za određeni scenario uzimamo ispad generatora 5 [10 MW], slika 3. Na ovom primeru želimo da pratimo prosečnu fitness vrednost cele populacije kroz svaku iteraciju, odnosno želimo da vidimo da se kroz svaku iteraciju dobija populacija boljih rešenja. Za maksimalni broj iteracija algoritma postavljena je vrednost od 150. Na UI prozoru može se videti grafik gde prati ovu promenu kroz svaku iteraciju, a u *Consumer List* možemo videti potrošače odabrane za isključenje (On/Off – 1).



Slika 2 Test 1, isključenje generatora 5

Odabrani potrošači za isključenje su potrošači od 7.6 MW i 2.4 MW, odgovarajuća kombinacija čija suma snage iznosi 10 MW. Svi potrošači su najmanjeg prioriteta (1). Najbolje rešenje je pronađeno u 127 generaciji. Na grafiku se može videti napredak cele populacije ka željenom rešenju. Može se uočiti da na početku GA funkcija veoma brzo napreduje i pronalazi mnogo bolja rešenja u svega nekoliko iteracija, ali to ima tendenciju za zasićenjem u kasnijim fazama.

Test 2 -Biramo model od 18 generatora i 48 potrošača. Testira se brzina algoritma da nađe željenu kombinaciju potrošača. Za scenario se uzima ispad generatora 7 od 450 MW. Za potrebe testiranja brzine isključuje se iscrtavanje grafika, na UI prozoru se dodaje labela **End time** koja opisuje potrebno vreme za završetak pretrage algoritma. Na slici 4 možemo videti sledeće : kroz 250 iteracija algoritma u roku od 25 ms GA funkcija pronalazi kombinaciju potrošača čija je fitness vrednost 3. Ovo ne predstavlja najbolju moguću kombinaciju potrošača za dati scenario ali je dovoljno dobro rešenje, rasterećenje odabranom kombinacijom je 453 MW. Ovo rešenje je pronađeno u 52-oj iteraciji algoritma. Svi potrošači predviđeni za isključenje su najmanjeg prioriteta 1.



Slika 3 Test 2, testiranje brzine GA funkcije

6. ZAKLJUČAK

Kako nestabilnost elektroenergetskih sistema ima loš uticaj na kvalitet usluge, elektroenergetski sistemi su dizajnirani tako da stabilnost bude uvek očuvana. Kao poslednja odbrana od kolapsa sistema vrši se automatsko rasterećenje mreže, čime se održava balans snaga u mreži. Razvojem komputerizovanih sistema koji vrše upravljanje elektroenergetskim sistemima, zbog mana konvencionalnih metoda rasterećenja mreža, stvara se mogućnost zamene novim bržim i boljim metodama (ILS- Intelligent Load Shedding).

Upravljanjem velikim elektroenergetskim mrežama postoji potreba za optimizacijom funkcije odabira potrošača za ILS metode. Kako bi rešili problem optimizacije kao tehniku pretrage i optimizacije koristi se genetski algoritam. Genetski algoritam je razvijen po principima genetike i daje veoma dobre rezultate za različitu vrstu problema. Primenom genetskog algoritma dobili smo funkciju koju smo testirali za dati problem optimizacije i kao rezultat toga na brz način dobili adekvatna željena rešenja kroz različite primere.

7. LITERATURA

- [1] D. S. Popović, "Modelovanje u elektroenergetici", Institut za energetiku i elektroniku, FTN, Novi Sad, 1999
- [2] Meng Zhang, "Modeling and Verification of Advanced UnderFrequency Load Shedding Schemes", University of Technology, Delft, 2016
- [3] Farrokh Shokooh, Shervin Shokooh, Jacques Tastet, Hugo Castro, Tanuj Khandelwal, Gary Donner, "An Intelligent Load Shedding System Application in a Large Industrial Facility", 2005
- [4] Randy L. Haupt, Sue Ellen Haupt, "Practical Genetic Algorithms", February 2004

Kratka biografija



Zoltan Berec je rođen u Novom Sadu 1992. godine. Srednju tehničku školu "Mihajlo Pupin" u Kuli završio 2011. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na katedri za električna merenja 2016. godine.