

METODA «SIMULACIJE KALJENJA» I NJENA PRIMENA NA POSTAVLJANJE KONDENZATORSKIH BATERIJA U SIMETRIČNIM RADIJALNIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

B.STOJANOVIĆ, TEHNIČKI OPITNI CENTAR, SRBIJA

UVOD

«Simulacija kaljenja» je nova optimizaciona metoda (prvi put primenjena 1982. godine) koja nalazi sve veću primenu u različitim oblastima nauke (statistička fizika, elektronika, teorija grafova i drugo). U domaćoj literaturi primenjena je ova metoda u oblasti optimalne rekonfiguracije distributivnih mreža.

Godine 1953. Metropolis i saradnici su predložili algoritam kojim se simulira kaljenje prethodno rastopljenog čvrstog tela, Laarhoven i Aarts (1). Tek posle 30 godina Kirkpatrick sa saradnicima i nezavisno od njih Černy, došli su do zaključka da postoji analogija između minimizacije funkcije cilja problema kombinatorijske optimizacije i laganog kaljenja čvrstog tela. Rešavanje se može ostvariti primenom Metropolis algoritma. Ovako dobijeni algoritam Kirkpatrick i saradnici nazvali su «simulacija kaljenja». Od tada primena ovog algoritma postaje posebna grana istraživanja.

Za rešavanje problema kompenzacije u radijalnim distributivnim mrežama upotrebljena je ova metoda prvi put 1990. godine, Chiang, Wang, Cockings i Shin (2,3).

Metoda «simulacije kaljenja» predstavlja najsavremeniji način rešavanja problema kombinatorijske optimizacije. Kombinatorijska optimizacija se bavi određivanjem optimuma funkcije čije su promenljive diskretne veličine (u metodi «simulacije kaljenja» promenljive mogu biti i kontinualne prirode).

Kod problema kompenzacije u radijalnoj distributivnoj mreži potrebno je postaviti kondenzatorske baterije (to jest odrediti sabirničke čvorove gde će se priključiti kondenzatorske baterije), definisati tip kondenzatorskih baterija (da li su one fiksnog ili regulacionog tipa) i usvojiti režim njihovog rada (odnosno njihovu podešenost) s obzirom na dijagram trajanja opterećenja mreže.

Cene kondenzatorskih baterija i njihove veličine su diskretne promenljive. One uzimaju skokovite vrednosti, a veličine su im ograničene maksimalnom snagom.

Kompenzacija u radijalnoj distributivnoj mreži je višedimenzionalni problem kombinatorijske optimizacije i može se rešiti samo aproksimativno na današnjim računarima. Ovo je problem koji se ne može rešiti za vreme jednako polinomu svoje dimenzije, koja predstavlja broj mesta gde se mogu montirati kondenzatorske baterije, to jest broj sabirnica u mreži.

Primer problema kombinatorijske optimizacije može se formulisati na skupu (R, C) , gde je:

R – konačan ili moguće izbrojljivo beskonačan skup konfiguracija (zove se još i prostor konfiguracija),
 a

C – funkcija cilja (cena).

Pretpostavlja se da je C tako definisana, da ukoliko je niža vrednost C -a utoliko je bolja odgovarajuća konfiguracija. Problem je u tome što treba naći konfiguraciju za koju C ima minimum, tj. (optimalnu) konfiguraciju.

Moguća su dva prilaza kada se želi rešiti problem kombinatorijske optimizacije. Jedan je globalno rešavanje, kod koga je vreme računanja vrlo dugačko. Drugi je aproksimativno rešavanje, kojim se dobija približno rešenje, ali za prihvatljivo vreme računanja.

Aproksimativni algoritmi se mogu podeliti u dve grupe: na algoritme prilagođene konkretnom problemu (specifične algoritme) i na generalne algoritme primenljive za široku lepezu problema. Poželjno je imati generalni aproksimativni algoritam. «Simulacija kaljenja» je takav algoritam. On uključuje u sebi neke karakteristike statističke tehnike ali i izvesne karakteristike algoritma iterativnog poboljšanja.

Primena algoritma iterativnog poboljšanja pretpostavlja definiciju konfiguracija, funkcije troška (funkcije cilja) i mehanizma generacija, tj. prosto uputstvo kako se generiše pomeranje od jedne na drugu konfiguraciju putem malog poremećaja. Iterativno poboljšanje je takođe poznato i kao pretraživanje po okolini ili lokalno pretraživanje. Polazeći od date konfiguracije, generiše se sekvenca iteracija, pri čemu se svaka sastoji od mogućeg prelaska sa tekuće konfiguracije na konfiguraciju izabranu iz okoline tekuće konfiguracije. Ako ova nova konfiguracija iz okoline ima nižu cenu, tekuća konfiguracija se zamenjuje ovom novom, u protivnom bira se druga i poredi po svojoj ceni. Algoritam završava kada se dobija konfiguracija čija je cena najmanja u odnosu na sve iz njene okoline. Nedostatak ovog algoritma je što on završava u lokalnom minimumu i što ne postoji informacija koliko lokalni minimum odstupa od globalnog. Takođe lokalni minimum zavisi od početne konfiguracije i nije moguće dati gornju granicu vremena izračunavanja. Ova metoda je generalno primenljiva. Da bi se izbegli neki od gore pomenutih nedostataka moguće je uvesti prihvatanje pomeranja koje odgovara povećanju funkcije cilja na ograničen način (u algoritmu iterativnih popravki samo pomeranja koja doprinose smanjenju u ceni su prihvaćena).

Algoritam koji sledi ovaj pristup je nezavisno uveden od strane Kirkpatrick-a i saradnika i Černy-ja (1). On je opšte poznat kao «simulacija kaljenja» s obzirom na analogiju sa simulacijom prekaljivanja čvrstih tela na čemu je zasnovan, ali je isto tako poznat kao «Monte Carlo» prekaljivanje, statističko hlađenje, probablističko penjanje uzbrdo, stohastičko relaksiranje ili algoritam probablističke razmene. Rešenja dobijena ovom metodom ne zavise od početne konfiguracije i imaju cenu najčešće blisku minimalnoj ceni. «Simulaciju kaljenja» je moguće posmatrati kao algoritam koji ne pokazuje nedostatke iterativne popravke, a ostaje generalno primenljiv kao ova metoda. Ipak prednost opšte primenljivosti je nekad umanjena vremensko računarskim problemima jer je algoritam «simulacije kaljenja» sporiji od algoritma iterativnih popravki. U izvođenju, ipak, algoritam «simulacije kaljenja» je aproksimativan. Ovo je zbog asimptotske prirode gore pomenutih rezultata vezanih za asimptotske vrednosti parametara koji regulišu konvergenciju algoritma. Kod primene algoritma, ove asimptotske vrednosti treba aproksimirati. Teoretski metoda konvergira asimptotski ka globalnom optimumu sa verovatnoćom 1 pod uslovom da funkcija cilja, pomeraji i postupak kaljenja zadovoljavaju određene uslove (za svaku vrednost kontrolnog parametra treba da se ostavri stacionarna distribucija kao što i vrednost kontrolnog parametra mora da se polako snižava do nule).

DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

U (4) prezentiran je kompjuterski paket SAMVAR zasnovan na primeni metode «simulacije kaljenja» za VAR planiranje u složenim radijalnim, simetričnim distributivnim mrežama, Hsiao, Chiang, Liu i Chen (4). Optimalno VAR planiranje je formulisano kao problem koji ima ograničenja i višestruku funkciju cilja. Ograničenja i funkcije cilja mogu biti nediferencijabilne tako da je formulacija problema bliža realnosti. Glavni razlog mada nedovoljno opravdan u našem slučaju za posmatranje višestruke funkcije cilja autori navode u činjenici da su pojedinačne funkcije cilja međusobno u konfliktu i da se ne mogu kombinovati u jednostruku funkciju cilja.

U (5) se razmatraju 3-fazne nesimetrične (neuravnotežene) radijalne distributivne mreže, Chiang, Wang, Tong i Darling (5). Postoji jedna funkcija cilja koja se sastoji od gubitaka električne energije i troška vezanog za kondenzatorske baterije u vidu cene kupovine baterija, montaže baterija, zamene baterija i uklanjanja postojećih baterija. Metoda rešavanja je zasnovana na kombinaciji metode «simulacije kaljenja» i tehnike grubog pretraživanja da bi se povećala brzina proračuna i nadalje sačuvao visoki kvalitet rešenja.

U poglavlju numerički rezultati analizirana je mreža iz (6) Chiang i Jumeau to jest iz (2,3).

U poslednje vreme prisutna je tendencija kombinovanja optimizacionih metoda. Ova tendencija je nastavljena i u ovom radu. Naime u kompleksnijem programu napravljenom za slučaj planiranja regulacionih baterija kada postoji onoliko programskih petlji koliko i nivoa opterećenja samo u petlji maksimalnog nivoa opterećenja primenjena je metoda «simulacije kaljenja» a u svim ostalim detaljno pretraživanje svih mogućih konfiguracija mreže za koje se sračunava funkcija cilja, Stojanović (7). Ovaj hibridni algoritam «simulacije kaljenja» i detaljnog pretraživanja nalazi optimalno rešenje za

veoma kratko vreme jer se algoritam posle generacije konfiguracije vršnog nivoa opterećenja ograničava samo na izgenerisane čvorove mreže (posmatra se mreža sa novim mnogo manjim brojem čvorova).

FORMULACIJA PROBLEMA

Problem postavljanja kondenzatorskih baterija u razgranatoj distributivnoj mreži da bi se miniizirala funkcija cilja postoji od 1961 Cook (8). Realnije razmatranje ovog problema nastaje sa člankom Greinger-a i saradnika iz 1985, Grainger i Civanlar (9). Funkcija cilja u ovom članku definiše se kao zbir gubitaka električne energije, gubitaka vršne aktivne snage i cene planiranih kondenzatorskih baterija u mreži. Detaljni izraz sa objašnjenjima dat je u Stojanović (10). Cena kondenzatorske baterije postavljene kod određene sabirnice i određene instalisane snage je pretpostavljena kao stepenasta nediferencijabilna funkcija (10) i Gallego, Monticelli i Romero (11). Nekad se cena kondenzatora množi sa godišnjom stopom, Čalović, Sarić i Djukanović (12), sobzirom da trošak baterije treba razvući na ceo period eksploatacije.

Problem koji se posmatra je mešovito celobrojni, nelinearni sa nediferencijabilnom funkcijom cilja kod koga se posmatraju pojedini nivoi opterećenja kod kojih se opterećenja uniformno menjaju u skladu sa krivom trajanja opterećenja. Potrošači u čvorovima su modelovani kao potrošači konstantne snage tokom određenog nivoa opterećenja. Potrošači se mogu modelovati i modelima konstantne impedanse i konstantne struje, Sarić i Čalović (13).

Posmatraju se dva tipa kondenzatorskih baterija, fiksne i regulacione. Fiksne imaju istu reaktivnu snagu za sve nivoe opterećenja a kod regulacionih reaktivna snaga opada kako opadaju nivoi opterećenja.

Ograničenja uslovljena opterećenjem

Usvojimo sledeće oznake:

$Q_{bmax,ll}$ - maksimalna ukupna reaktivna snaga instalisanih baterija za određeni nivo opterećenja,

$Q_{loss,ll}$ - disipacija reaktivne snage za nekompensovanu mrežu bez kondenzatorskih baterija (generisana reaktivna snaga vodova na otočnim kapacitivnim admitansama π zamenske šeme voda uzeta u obzir) za određeni nivo opterećenja,

$Q_{dem,ll}$ - potrošnja reaktivne snage za određeni nivo opterećenja,

onda se ima,

$$Q_{bmax,ll} = Q_{loss,ll} + Q_{dem,ll} \quad (1)$$

Ako je nadalje:

$Q_{bmin,ll}$ - minimalna ukupna reaktivna snaga instalisanih baterija za određeni nivo opterećenja,

$P_{00,ll}$ - aktivna snaga na napojnom čvoru za određeni nivo opterećenja, onda važi sledeća relacija:

$$Q_{bmin,ll} = Q_{loss,ll} + Q_{dem,ll} - P_{00,ll} \frac{\sqrt{1 - 0.85^2}}{0.85} \quad (2)$$

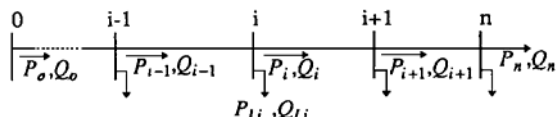
u smislu održavanja faktora snage napojnog čvora iznad 0.85. Za detalje izvođenja relacija (1) i (2) pogledati referencu (7).

Ograničenja uslovljena opterećenjem definisana relacijama (1) i (2) smanjuju prostor konfiguracija (posmatranu populaciju) mogućih rešenja u ogromnoj meri a da se ne izgubi globalni optimum. Ona čine metodu rešenja izvodljivom, bez njih postupak nije ograničen i problem se praktično ne može rešiti.

Efikasni algoritam analize tokova snaga

U programskom paketu iz ovog rada korišćen je podprogram za efikasni algoritam analize tokova snaga iz Jiang (14). Korišćen je algoritam za simetrične radijalne distributivne mreže samo sa bočnim granama i jednom transformatorskom stanicom kod napojnog čvora. Rešavanje je izvršeno Njutn-Rafsonovom metodom nazvanom Dist-flow metoda, Baran i Wu (15,16). Zbog numeričkih svojstava submatrica Jakobijana sistema sam algoritam se svodi na rešavanje niže datih jednačina zamenom unapred i zamenom unazad da bi se odredila radna tačka.

Sobzirom na radijalnu strukturu distributivnog sistema, ako je poznata injektirana snaga i fazor napona napojnog čvora (transformatorska stanica) moguće je iste vrednosti dobiti zamenom unapred primenom jednačina protoka za grane, i u svim narednim čvorovima (pogledaj sliku 1 i jednačine 3,4 i 5).



Slika 1: Jednodopolna šema radijalne mreže

Vodovi su predstavljeni impedansama $z_i = r_i + jx_i$, a potrošnja je modelovana modelom konstantne snage $S_L = P_L + jQ_L$.

Aktivna snaga, reaktivna snaga i veličina napona na početku grane – P_i, Q_i, V_i koriste se da bi se izrazile iste promenljive na kraju grane i to kao što sledi.

$$P_{i+1} = P_i - r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{Li+1} \quad (3)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{Li+1} \quad (4)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (5)$$

Analogno, ako se poznaju veličine na kraju voda, moguće je sračunati respektivno veličine na početku voda što predstavlja zamenu unazad. Ova zamena završava sa vrednostima dobijenim u ulaznom čvoru (transformatorska stanica). Na ovaj način dobija se nova procena vrednosti na početku voda.

Sukcesivnom primenom ove dve zamene rešava se algoritam tokova snaga. Vrednosti aktivne i reaktivne snage na krajevima glavnog fidera i na krajevima bočnih grana su nule. U prvoj iteraciji može se pretpostaviti jedinična per unit vrednost napona u ovim čvorovima. Primenom zamene unazada dobija se procena za veličine na početku voda. Zatim se ponovo proračunavaju veličine duž voda ka njegovom kraju.

U praksi prekidamo algoritam kada su promene napona i snaga dovoljno male u dve uzastopne iteracije, obično se uzima vrednost 0.001 per unit.

«SIMULACIJA KALJENJA»

Neka je C_i tekuće rešenje a C_j rešenje iz okoline koje je generisano neposredno pre rešenja C_i . $\Delta C_{ij} = C_j - C_i$ je razlika ova dva rešenja. c je kontrolni parametar nazvan "temperatura" i on ima visoku vrednost na početku algoritma i postepeno se smanjuje tokom procesa "kaljenja". Mehanizam se matematički najbolje opisuje pomoću Markovljevih lanaca: niza pokušaja, kada je ishod svakog pokušaja zavistan isključivo od ishoda prethodnog. U slučaju »simulacije kaljenja« pokušaji odgovarju pomeranjima - rešenjima i jasno je da ishod pomeranja -rešenja zavisi isključivo od prethodnog (to jest od tekuće konfiguracije). Postoje dva tipa algoritma "simulacije kaljenja", homogeni i nehomogeni. Kod homogenog svaki Markovljev lanac ima konstantnu temperaturu za sva svoja rešenja a postoje različiti

Markovljevi lanci za koje temperatura postepeno opada. Kod nehomogenog postoji jedan Markovljev lanac sa različitim kontrolnim parametrom za svaki sukcesivni par rešenja. "Simulacije kaljenja" se može prikazati sledećom šemom u pseudo - Paskalu, Johnson, Aragon, McGEOCH i Schevon (17):

Startuj sa bilo kojim početnim rešenjem,
poremeti sa tekuće (j) konfiguracije (stanja) na sledeću (i),
nađi ΔC_{ij} ,
ako je $\Delta C_{ij} < 0$ zameni konfiguraciju j konfiguracijom i,
ako nije sračunaj $\exp(-\Delta C_{ij}/c)$,
ako je $\exp(-\Delta C_{ij}/c)$ veće od slučajnog broja uniformno raspodeljenog u intervalu [0,1), zameni konfiguraciju j konfiguracijom i (Metropolis kriterijum (1)),
ako nije zadrži tekuću konfiguraciju j.
Stani kada se sistem zaledi, to jest nema primetnog poboljšanja u rešenju.

»SIMULACIJA KALJENJA« ZA PROBLEME SA OGRANIČENJIMA

Postoji još jedan korak više kod "simulacije kaljenja" kada postoje ograničenja. Ovaj korak je provera podobnosti rešenja, pre generisanja nove konfiguracije putem generatora slučajnih brojeva. Ako je novo rešenje podobno ono se poredi sa prethodnim, a ako nije, ono se odbacuje i traži se novo sve dok se ne pronađe ono koje je podobno.

Za algoritam sa fiksnim baterijama kao i sa regulacionim baterijama opšte ograničenje je minimalna i maksimalna ukupna snaga svih ugrađenih kondenzatorskih baterija. Ova vrednost poznata je unapred, kao ulazni podatak u algoritam i pri perturbacijama generisanim generatorom slučajnih brojeva uzima se u obzir ova vrednost tako da su sva rešenja podobna sa ove tačke gledišta.

U slučaju regulacionih baterija njihova veličina opada kako opada i nivo opterećenja, ovo ograničenje je nametnuto snagom ugrađenih baterija, ono se uzima u obzir mehanizmom generisanja konfiguracija tako da su generisane konfiguracije podobne.

OSNOVNI ELEMENTI U »SIMULACIJI KALJENJA«

A. Prostor konfiguracija (nekad nazvan i populacija)

Veličina prostora konfiguracija zavisi od broja mogućih mesta za postavljanje kondenzatora to jest od broja sabirnica i mogućih veličina kondenzatora na svakoj lokaciji. Ovo je najčešće beskonačno izbrojiv skup. Ograničiti ovaj prostor je od vrhunskog značaja. Ograničenja kojima se ovaj prostor limitira imaju gorući smisao pod uslovom da se ne eliminiše globalni optimum.

B. Pomeraji (mehanizam perturbacije, mehanizam poremećaja)

Kod algoritma u ovom radu korišćen je jedinstveni mehanizam perturbacije u sledeća tri koraka:

1. korak: generatorom slučajnih brojeva odredi ukupnu snagu planiranih baterija.
2. korak: generatorom slučajnih brojeva odredi snagu svake planirane baterije pojedinačno.
3. korak: generatorom slučajnih brojeva odredi lokaciju svake planirane baterije.

C. Mehanizam hlađenja

Korišćen je prosti mehanizam hlađenja a postoje i vrlo složeni (1). Kako je primenjeni algoritam homogeni ima se konstantna temperatura za svaki generisani Markovljev lanac. Pravilo snižavanja temperature je prosto $T_{k+1} = 0.95 * T_k$. T_{k+1} je temperaturna vrednost (k+1) og Markovljevog lanca. Povećanjem broja Markovljevih lanaca, postepeno i lagano opada vrednost temperature i sistem se lagano hladi.

Početna vrednost temperature treba da je vrlo visoka da omogući da se svako pomeranje prihvati u slučaju optimizacionog problema bez ograničenja. Za problem kompenzacije reaktivne snage koji je problem sa ograničenjima pomeraji se nekad odbacuju zbog narušavanja ograničenja. U našem slučaju početna vrednost temperature je vrlo visoka, i kod jednostavnijeg problema fiksnih baterija

iznosi 5000 "°C" a za komplikovaniji problem regulacionih baterija iznosi 10000 "°C". Ne postoji generalno pravilo sa kojom početnom temperaturom startovati, i nekoliko hiljada "stepeni" u potpunosti zadovoljava problem.

D. Stop kriterijum

Kod problema ovde tretiranog postoji stop kriterijum za terminiranje svakog Markovljevog lanca i stop kriterijum za terminiranje algoritma.

Kod fiksnih baterija Markovljev lanac terminira kada $\Delta C_{k,k-1}/C_k$ postane manje od jedne konstante koja se usvaja na početku algoritma (1). Što je ova konstanta niža, duže je CPU vreme egzekucije algoritma. C_k i C_{k-1} su dva susedna podobna rešenja.

Za regulacione baterije Markovljev lanac terminira kada njegova dužina dostigne jednu prethodno određenu vrednost datu izrazom $1,1^k * n_0$, gde je k redni broj Markovljevog lanca, a n_0 njegova početna vrednost.

Algoritam u oba slučaja terminira kada odnos prihvatanja postane dovoljno mali. Koliko mali zavisi od nas, što je manja ova vrednost duže je CPU vreme a rešenje bolje. Odnos prihvatanja se definiše kao količnik broja prihvaćenih rešenja i broja svih rešenja generisanih jednim Markovljevim lancem. Program takođe terminira ako se premaši maksimalna dužina Markovljevog lanca (promenljiva označena sa LANAC u programu za generalni slučaj postavljanja baterija).

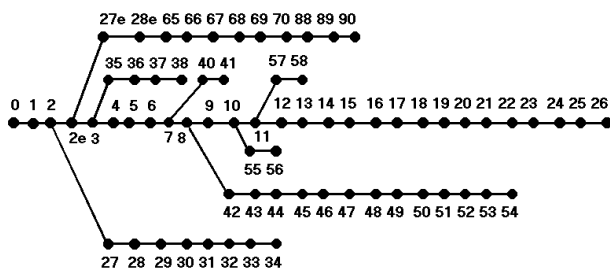
Algoritmi za rešavanje u slučaju fiksnih i u slučaju kombinacije fiksnih i regulacionih baterija dati su u (7).

NUMERIČKI REZULTATI

Razvijena su dva programa, jedan prostiji za problem postavljanja fiksnih kondenzatorskih baterija i drugi komplikovaniji za generalni slučaj postavljanja fiksnih i regulacionih kondenzatorskih baterija i oba su pisana u programskom jeziku Fortran 77.

Test sistem

Korišćen je 12.66 kV distributivni sistem sa 70 čvorova i 9 bočnih grana izveden iz dela PG&E distributivnog sistema, prikazan na slici 2, uzet iz anglosaksonske literature. Detaljni podaci o njemu su dati u (15,16). Pretpostavljeno je da se koriste kondenzatorske baterije sa korakom od 300 kVar-a sa fiksnom cenom montaže od 1000 \$/mestu montaže i promenljivom cenom od 900 \$ po jedinici od 300 kVar-a. Cena regulacionih baterija odgovara njihovoj podešenosti u najgorem slučaju (maksimalni nivo opterećenja).



Slika 2 - Ispitni sistem (15,16)

Dozvoljene tolerancije napona u čvorovima iznose $\pm 10\%$ od nazivnog napona (12.66 kV). Cena gubitaka aktivne snage za vršni nivo opterećenja i period od godinu dana koji se posmatra je zanemarena ($k_p=0$ \$/kW/godini), dok je cena gubitaka aktivne energije 0.06 \$/kWh. Napon napojnog čvora iznosi 12.66 kV tokom minimalnog i nominalnog nivoa opterećenja. Za vreme vršnog nivoa opterećenja on iznosi $1.05 * 12.66$ kV. Potrošači su modelovani kao potrošači konstantne snage. Optimalni rezultati primene metode "simulacije kaljenja" na kompenzaciju u ovom sistemu dati su u Tabeli 1.

Kao funkcija cilja postavlja se minimizacija gubitaka električne energije, gubitaka vršne aktivne snage i cene planiranih kondenzatorskih baterija u mreži.

Tabela 1. Rezultati primene metode "simulacije kaljenja" na ispitni sistem

Podaci o nekompensovanom sistemu						
Gubici aktivne snage za maksimalni nivo opterećenja (P_L u kW) 755 kW,						
Gubici električne energije za period od godinu dana (E_L u MWh) 2327.4 MWh,						
Vrednost funkcije cilja nekompensovanog sistema (F_{max} u \$) 139642 \$.						
Faktor snage napojnog čvora je manji od 0.85.						
Napon na čvoru 50 pada ispod 0.9*12.66kV.						
Podaci o kompenzovanom sistemu						
Kondenzatorske baterije	prostiji slučaj, samo fiksne			generalni slučaj, fiksne i regulacione		
Čvor gde je postavljena baterija	17 50			16 50		
Nivo opterećenja	1	2	3	1	2	3
Nazivne snage baterija u kVar	300	300	300	300	300	300
	1200	1200	1200	2400	1200	600
P_{Lmin} u kW	538			477		
E_{Lmin} u MWh	1578.4			1505.2		
F_{min} u \$ vrednost funkcije cilja optimuma (kompensovani sistem)	101201			98613		
ΔF_{max} u \$ ušteda	38441			41028		

ZAKLJUČCI

U ovom radu izloženo je rešavanje problema minimizacije funkcije cilja radijalne, simetrične, distributivne mreže za slučaj najekonomičnijih tokova reaktivnih snaga primenom metode »simulacije kaljenja«.

Dobijeni rezultati ukazuju na prednosti ove metode i daju čvrste osnovu za njenu primenu u realnim distributivnim mrežama u procesu njihovog planiranja kada vreme proračuna nije od primarnog značaja jer se postižu znatne uštede (41028 \$, Tabela 1) a najveće vreme proračuna za ovu relativno prostu distributivnu mrežu na PC-u Pentium II, 533 MHz je 12 minuta.

A. Način postavljanja kondenzatorskih baterija u radijalnim distributivnim mrežama

Ne postoji generalni odgovor na ovo pitanje. Njega je moguće dobiti nakon primene programa u konkretnom slučaju (konkretnoj radijalnoj distributivnoj mreži).

B. Bliskost globalnom optimumu

Primena metode „simulacije kaljenja“ na primeru pokazuje da što su ulazni parametri rigorozniji blizina globalnom optimumu je veća ali vreme računanja je drastično duže. Algoritam prihvata gora rešenja (povećanje vrednosti funkcije cilja) i može terminirati sa ovakvim gorim rešenjem. Ovo se prevazilazi monitorisanjem programa tokom njegove stvarne egzekucije. Pod monitorisanjem programa podrazumeva se beleženje minimalne vrednosti funkcije cilja sve do trenutka stvarnog terminiranja programa. U našem primeru rešenje koje je dobijeno, dobijeno je upravo ovim monitorisanjem.

C. Poređenje razvijenog algoritma sa drugim algoritmima za rešavanje

Poređenjem metode »simulacije kaljenja« iz ovog članka sa istom metodom primenjenom kod drugih autora (2,3) vidimo da metodu "simulacije kaljenja" ima smisla primenjivati samo u petlji vršnog novoa opterećenja to jest da je jedino hibridni algoritam sa metodom potpunog pretraživanja, u nižim petljama, za niže nivoe opterećenja, realan u konkretnim primenama za kompenzaciju sa gledišta proteklog CPU vremena.

D. Naponska ograničenja

Naponska ograničenja analizirana su u Test sistemu iz čega se vidi da kondenzatori sami po sebi, mada poboljšavaju svojom ugradnjom naponski profil, ne mogu da ga toliko poprave da bi bila ispoštovana naponska ograničenja. Pri nedovoljnom naponu u mreži (što je uglavnom slučaj pri maksimalnom nivou opterećenja) potrebno je ugraditi još i regulacione transformatore.

ZAHVALNICA

Autor želi da iskaže svoju zahvalnost gospodinu dipl. el. inž. Ebel Ivi iz Beograda za njegovu neprocenjivu pomoć u kreiranju programskog paketa na Fortranu 77 u primeni metode »simulacije kaljenja« za generalni slučaj primene kondenzatorskih baterija kao i prof. Milošu S. Nedeljkoviću dipl. maš. inž., mašinski fakultet Beograd, na pomoći pri kreaciji programskog paketa na Fortranu 77 za slučaj fiksnih kondenzatorskih baterija i njegovim izuzetno korisnim sugestijama u sprovođenju ovog istraživanja.

LITERATURA

1. Laarhoven P.J. and Aarts E.H.L., 1987, «Simulated Annealing: Theory and Applications», «Reidel, Dordrecht»
2. Chiang H.D., Wang J.C., Cockings O. and Shin H.D., 1990, «Optimal capacitor placements in distribution systems: Part 1: A new formulation and the overall problem», «IEEE Transactions on Power Delivery», «Vol.5, No.2, April 1990», 634-642
3. Chiang H.D., Wang J.C., Cockings O. and Shin H.D., 1990, «Optimal capacitor placements in distribution systems: Part 2: Solution algorithms and numerical results», «IEEE Transactions on Power Delivery», «Vol.5, No.2, April 1990», 643-649
4. Hsiao Y.T., Chiang H.D., Liu C.C. and Chen Y.L., 1994, «A computer package for optimal multi-objective var planning in large scale power systems», «IEEE Transactions on Power Systems», «Vol.9, No.2, May 1994», 668-676
5. Chiang H.D., Wang J.C., Tong J. and Darling G., 1995, «Optimal capacitor placement, replacement and control in large-scale distribution systems: system modeling and a new formulation», «IEEE Transactions on Power Systems», «Vol.10, No.1, February 1995», 356-369
6. Chiang H.D. and Jumeau R. J., 1990, «Optimal network reconfigurations in distribution systems: Part 2: Solution algorithms and numerical results», «IEEE Transactions on Power Delivery», «Vol.5, No.3, July 1990», 1568-1574
7. Stojanović B., 1997, «Metoda »simulacije kaljenja« i njena primena na kompenzaciju u radijalnim distributivnim mrežama», Magistarski rad, Beograd
8. Cook R.F., 1961, «Optimizing the application of shunt capacitors for reactive volt-ampere control and loss reduction», «AIEE Trans.», «Vol.80, August 1961», 1961
9. Grainger J.J. and Civanlar S., 1985, «Volt/var control on distribution systems with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators: Part 1: The overall problem, Part 2: The solution method and Part 3: The numerical results», «IEEE Transactions», «Vol. PAS-104, No.11, November 1985», 3278-3297
10. Stojanović B., 2004, «Primena metode »simulacije kaljenja« na problem kompenzacije reaktivne snage u simetričnim radijalnim distributivnim mrežama», «Elektroprivreda», «Jul-Oktobar, Broj 3», 35-49
11. Gallego R.A., Monticelli A.J. and Romero R., 2001, «Optimal capacitor placement in radial distribution networks», «IEEE Transactions on Power Systems», «Vol. 16, No.4, November 2001», 630-637

12. Čalović M., Sarić A. and Djukanović M., 1996, «Dynamic programming based multi-stage optimization of shunt capacitors in radial distribution systems», «Archive of Electrical Engineering», «79, (6)», 479-488
13. Sarić A. i Čalović M., 1992, «Jedan algoritam za proračun naponskih stanja, tokova snaga i gubitaka u radijalnom distributivnom sistemu», «Elektrodistribucija», «god.20, br.3», 127-140
14. Jiang D., May 1994, «Electric distribution system reconfiguration and capacitor switching», Magistarski rad, Worcester Polytechnic Institute
15. Baran M.E. and Wu F.F., 1989, «Optimal capacitor placement in radial distribution system», «IEEE Transactions on Power Delivery», «Vol. 4, No.1, January 1989», 725-734
16. Baran M.E. and Wu F.F., 1989, «Optimal sizing of capacitors placed on radial distribution systems», «IEEE Transactions on Power Delivery», «Vol. 4, No.1, January 1989», 735-743
17. Johnson D.S., Aragon C.R., McGEACH L.A. and Schevon C., «Optimization by simulated annealing: an experimental evaluation; part I, graph partitioning», «AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, preprint», 865-892