

Analiza industrijskih omrežij

Uroš Kerin¹, Grega Bizjak¹, Peter Žunko¹

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: uros.kerin@fe.uni-lj.si

Povzetek. V članku podajamo izhodišča za analizo obratovanja industrijskih omrežij v različnih stanjih. Delo obsega opis splošnih karakteristik industrijskih omrežij, njihovo umestitev v segment elektroenergetskih omrežij, poenostavljeno klasifikacijo obratovalnih stanj in primer analize na modelu tipičnega industrijskega omrežja. Analizo smo izvedli z uporabo simulacijskega orodja s katerim smo v modelu omrežja simulirali različna obratovalna stanja. Pri analizah posameznih stanj smo poudarili parametre električnih veličin, ki jih je treba v posameznem primeru obravnavati, ter podali rezultate v numerični in grafični obliki.

Ključne besede: Industrijska omrežja, analiza obratovanja, dinamika obratovanja, simulacijski model

Analysis of industrial power networks

Extended abstract. In this paper we propose guidelines for analyzing industrial power networks. We present basic structural differences that distinguish industrial power networks from other distribution networks, shortly describe the possible operating states and classify them with regard to various operating conditions. For testing purposes we built a model of a typical industrial power network. Its topology consists of different types of loads, and in particular asynchronous motors and a number of generators, able to assure partial autonomy of the network during critical operating states. In the simulation process, the model is put under stress of various contingencies causing dynamic changes in the load flow, voltage and frequency oscillations or even partial network islanding. To determine some particular characteristics of the network, the network response is monitored and afterwards analyzed. Simulation processes are made by using the Netomac power system, which is a powerful software tool designed for simulation and analysis of electrical power systems.

With our model, the following operating states or contingencies are simulated: steady states, one-and-three phase short circuits, three-phase short circuits in utility's network followed by islanding of the part of the investigated network and starting-up of two 6 kV motors. In each case the network response is individually analyzed and presented either by numerical or graphical results.

Keywords: industrial power networks, operation

analysis, operation dynamics, simulation model,

1 Uvod

Upravitelji industrijskih elektroenergetskih objektov se čedalje bolj ažurno odločajo za investicije v optimizacijo in modernizacijo njihovih omrežij. Trendi zmanjševanja obratovalnih stroškov narekujejo podrobne analize obstoječih stanj, na podlagi katerih je mogoče predlagati smiselne in predvsem ekonomsko sprejemljive izboljšave. Današnje analize obratovanja elektroenergetskih omrežij temeljijo na uporabi različnih programskih orodij, ki na modelih dejanskih omrežij omogočajo simulacije poljubnih obratovalnih stanj. Večina programskih orodij je namenskih in v splošnem specializiranih bodisi za izračune stacionarnih bodisi simulacije dinamičnih razmer, manj pa je orodij, ki hkrati omogočajo oboje.

V članku smo predstavljene analize razmer izvedli z uporabo programskega orodja NETOMAC [1]. Orodje je zmogljiv simulator električnih pojavov ter omogoča statično in dinamično analizo elektroenergetskih omrežij. Analize smo izvedli na modelu tipičnega industrijskega omrežja, ki združuje številne asinhrono pogone, impedančna bremena, kompenzacijske elemente in lastno generacijo. Rezultate analiz posameznih obratovalnih stanj smo predstavili numerično in grafično ter poudarili ključne elemente, ki jih je pri tovrstnih analizah priporočljivo upoštevati.

2 Karakteristike industrijskih omrežij

Industrijska omrežja lahko klasificiramo kot razdelilna omrežja s topologijo omejenega obsega, ki združuje različne napetostne nivoje. Navadno so večstransko

napajana, bodisi iz prenosnega bodisi javnega razdelilnega omrežja, in sicer prek transformatorjev na odjemnih mestih. Transformatorji lahko obratujejo pri različnih vrstah ozemljitve nevtralne točke. Ker je neprekinjeno obratovanje v številnih industrijskih procesih ključnega pomena, številna industrijska omrežja obratujejo z izoliranim zvezdiščem transformatorjev. Število napajalnih dovodov je odvisno od velikosti omrežja in zahtev po zanesljivosti napajanja, tako da imajo tovrstna omrežja v praksi največkrat vsaj dve neodvisno napajani odjemni mesti. V povprečju je priključna moč industrijskih omrežij od 250 kVA do 100 MVA, v izrednih primerih tudi več, notranji napetostni nivoji pa so od 0,4 kV do 110 kV. Pri oblikovanju odjemne karakteristike prevladujejo predvsem številni asinhroni pogoni in variabilna bremena, ki so povezana s specifičnimi proizvodnimi postopki (na primer elektrolizo). Nekatera omrežja imajo zaradi specifičnosti bremen, industrijskih postopkov ali ugodne lokacije tudi možnost lastne proizvodnje električne energije. Proizvodnja je največkrat prisotna v procesu kogeneracije z drugimi tehnološkimi mediji in redkeje v smislu samostojnih proizvodnih enot, v obliki manjših elektrarn. Čeravno tovrstna lastna proizvodnja v povprečju ne presega 30% celotne porabe električne energije določenega elektroenergetskega objekta, mu še vedno omogoča vsaj delno avtonomnost, predvsem v času nenapovedanih izpadov zunanega napajanja. V omrežjih, kjer takšna lastna proizvodnja električne energije ni mogoča, avtonomnost dosežemo z vgradnjo rezervnih proizvodnih enot. V ta namen se uporabljajo predvsem dizelski agregati velikih moči, ki jih zaganjamo po potrebi.

Topološke razsežnosti industrijskih omrežij so različne. Če se omrežja nahajajo v urbanem okolju, so manjša, strnjena in v celoti kabelska, medtem ko so v odprtih okoljih večja, obsežnejša ter tako kabelska kot tudi nadzemna. Geografsko obsegajo do nekaj hektarov velika območja, pri čemer je lahko skupna dolžina internih povezav tudi nekaj deset kilometrov. Zaradi različnih napetostnih nivojev, sposobnosti hitrega prilagajanja dinamiki delovnih procesov in zagotavljanja neprekinjenega napajanja prioriternih bremen je značilnost industrijskih omrežij tudi kompleksna struktura.

3 Obratovalna stanja industrijskih omrežij

Obratovanje industrijskih omrežij je zelo raznoliko. Proizvodnja posameznih industrijskih panog temelji na uporabi specifičnih strojev in naprav, ki omrežje obremenjujejo skladno z njihovimi obratovalnimi karakteristikami. Njihovi upravljavci se tako vsak dan srečujejo z individualnimi problemi ohranjanja zanesljivosti obratovanja, pri čemer velja poudariti predvsem ohranitev kontinuitete obratovanja prioriternih

tehnoloških procesov. Zaradi naraščajočega števila elektronsko reguliranih naprav je poleg zanesljivosti napajanja v ospredju tudi vprašanje kakovosti električne energije. Ker so industrijska omrežja na splošno lokalno zaprti sistemi, je medsebojni vpliv priključenih porabnikov nemogoče zanemariti. Še posebno je tovrstna problematika izrazita tam, kjer izvajanje zahtevnih industrijskih procesov poteka hkrati z obratovanjem električno občutljivih elektronskih naprav.

Obratovanje industrijskih omrežij je na splošno analogno obratovanju javnih omrežij. Dinamika sprememb obratovanja je izrazita, vseskozi so prisotne motnje zunanega ali notranjega izvora, prisotno je dnevno izvajanje stikalnih manevrov in prilagajanje topologije omrežja trenutnim razmeram. Nasprotno pa je obratovanje industrijskih omrežij zaradi planskega dela večinoma predvidljivo. Izjeme nastanejo le pri prehodnih motnjah iz naslova kakovosti električne energije ali pri defektnih stanjih. V smislu nazornejšega delitve razmer smo različna obratovalna stanja industrijskih omrežij uvrstili v tri skupine: normalno obratovalno stanje, obratovanje v času motenj in obratovanje v času defektnih stanj (glej poglavje 4, tretji odstavek).

Normalno obratovalno stanje industrijskega omrežja definiramo kot stanje, ko obratovanje postroja poteka skladno s predvidenim planom. Definiramo ga na podlagi vsakdanjih obratovalnih razmer, v katerih zajamemo tudi manjša nihanja napetosti, harmonike, fliker in morebitno fazno nesimetrijo oziroma vse tiste pojave, ki so v industrijskih omrežjih vseskozi prisotni in kratkoročno ne povzročijo defektnih stanj omrežja.

Obratovanje v času motenj definiramo kot obratovalno stanje, v katero poleg razmer normalnega obratovanja vključimo še prehodne pojave, ki že lahko povzročijo defektna stanja omrežja. V to obratovalno stanje poleg trajnih pojavov spadajo še večja nihanja napetosti in druge oscilacije, ki navadno nastanejo kot posledica zagonov bodisi večjih motorjev, vklopov ali izklopov kompenzacijskih naprav, trenutnih preobremenitev ali motenj v javnem omrežju.

Obratovanje v času defektnih stanj industrijskega omrežja definiramo kot obratovanje v času kritičnih okvar. Tovrstne okvare so največkrat različni kratki stiki, atmosferska praznjenja ali izpadi zunanega napajanja. Okvare neposredno vplivajo na obratovalne razmere v omrežju. Povzročijo delovanje zaščitnih elementov in s tem prerazporeditev pretokov moči, v izrednih primerih pa tudi prehod v otočno obratovanje.

4 Analiza obratovanja industrijskih omrežij

Analize obratovalnih stanj industrijskih omrežij so lahko s pomočjo merilnih naprav, simulacijskih orodij in analitičnih postopkov zelo detajlne. Hkratna uporaba

več medsebojno neodvisnih metod omogoča zajem obširnega nabora podatkov, ki vsebuje zapis o dinamiki obratovanja in specifičnih lastnostih izbranega omrežja. Zahtevnejše analize dejanskih omrežij s konkretno izpostavljenimi obratovalnimi problemi so zaradi tega sestavljene iz več sklopov različno osnovanih raziskav, s katerimi ločeno obravnavamo enake obratovalne razmere istega omrežja. Sklopi navadno obsegajo izvedbo meritev na več lokacijah znotraj obravnavanega omrežja, izdelavo modela omrežja in simulacije obratovalnih razmer, primerjavo podatkov meritev in simulacij ter dodatno ovrednotenje razmer na podlagi primernih analitičnih postopkov.

Temelje raziskav obratovalnih stanj omrežij najbolje predstavljajo podatkovne baze meritev karakterističnih veličin, s katerimi je posneta dinamika obratovanja dejanskega omrežja. Baze sestavljajo merilni podatki, pridobljeni v premišljeno izbranih časovnih intervalih v daljšem opazovanem obdobju. S strokovnim pregledom merilnih rezultatov lahko poleg osnovnih značilnosti obratovanja ugotovimo tudi parametre kakovosti električne energije, šibka mesta omrežja in trend rasti ali upada porabe energije. Zgolj rezultati meritev pa niso vedno primerni za dolgoročno napoved porabe, raziskovanje kritičnih stanj omrežja in ugotavljanje vpliva modernizacije omrežja. V ta namen uporabimo model omrežja, ki ga v smislu verodostojnosti umerimo glede na razpoložljive podatke opravljenih meritev.

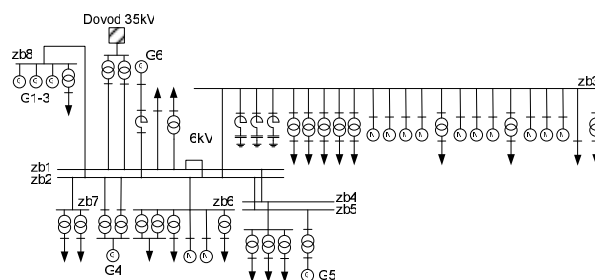
Merodajen model omrežja je primeren za analizo poljubnih stanj omrežja. Pri analizah industrijskih omrežij v modelu navadno simuliramo razmere, s katerimi zajamemo več obratovalnih lastnosti omrežja hkrati. Standardni nabor simulacij največkrat obsega simulacije normalnega obratovalnega stanja, simulacije razmer v času prehodnih okvar in simulacijo razmer v času defektov. Če proučujemo morebitno modernizacijo omrežja, nabor simulacij razširimo še s simulacijami obratovalnih stanj v omrežju s spremenjenimi lastnostmi. Rezultate simulacij vedno podamo v numerični in grafični obliki, v odvisnosti od simuliranih stanj pa lahko rezultate nekaterih simulacij primerjamo tudi z dnevnim obratovanjem dejanskega omrežja.

Dodatno lahko karakteristike omrežja raziščemo tudi z analitičnimi postopki in metodami. Uporabne so predvsem za proučevanje pretokov moči stacionarnih obratovalnih stanj in ugotavljanje maksimalnih kratkostičnih moči in kratkostičnih tokov v primeru kratkih stikov. Ker pa tovrstne metode navadno niso primerne za velika kompleksna omrežja, njihova izvedba namreč postane izredno dolgotrajna, jih največkrat uporabimo le pri analizi manjših omrežij.

5 Model industrijskega omrežja

Primer analize omrežij smo izvedli na simulacijskem modelu tipičnega industrijskega omrežja, ki združuje tri napetostne nivoje: 35 kV, 6 kV in 0,4 kV. Omrežje ima

karakteristično topologijo z dvema napajalnima transformatorjema s prestavo 35/6 kV, ki obratujeta pri izoliranem zvezdišču. Enopolna shema modela omrežja je prikazana na sliki 1. Osrednji del omrežja sta 6 kV dvosistemski zbiralki, prek katerih so posredno ali neposredno napajani vsi porabniki v omrežju. Porabniško strukturo tvori 20 impedančnih bremen s stalnim odjemom in 12 asinhronskih motorjev. Večina impedančnih bremen je nizkonapetostna in se napajajo prek transformacije 6/0,4 kV, medtem ko sta dve bremen 6 kV. Vsi asinhronski motorji obratujejo na 6 kV in imajo kvadratno odvisno bremensko karakteristiko. Omrežje ima tudi lastno proizvodnjo električne energije. Sestavljena je iz petih hidro in enega parnega agregata, ki poleg električne energije proizvaja tudi tehnološko paro. Skupna dolžina kabelskih in nadzemnih povezav vseh treh napetostnih nivojev je 9,7 km oziroma 12 km. Maksimalna moč odjema je 11 MW, maksimalna moč lastne generacije je 8 MW in maksimalna kompenzacija jalove moči 6 MVar.



Slika 1: Model tipičnega industrijskega omrežja
Figure 1: Model of a typical industrial power system

6 Analiza obratovanja modela omrežja

V modelu omrežja smo za prikaz postopkov analize simulirali izbrana obratovalna stanja:

1. normalno obratovalno stanje,
2. enopolni zemeljski stik in tripolni kratki stik,
3. prehod v otočno obratovanje in
4. zagon motorjev.

V obravnavi posameznega primera smo podali klasifikacijo in osnovne smernice za izvedbo analiz posameznih obratovalnih stanj ter jih zaključili s kratko analizo simuliranih razmer na modelu omrežja.

6.1 Pretoki moči in napetostne razmere v normalnem obratovalnem stanju

Normalno obratovalno stanje omrežja definiramo kot stanje, v katerem je izpolnjeno ravnovesje pretokov moči, zahtevane napetostne razmere in obratovanje porabnikov v skladu z obratovalnim načrtom. Omrežje takrat obratuje v določeni obratovalni točki in s stalnim odjemom. Tako opisano stanje omrežja lahko poenostavljeno definiramo tudi kot stacionarno

obratovalno stanje in velja le za trenutno obravnavano konfiguracijo omrežja. V tem primeru razmere v omrežju obravnavamo na podlagi izračunov stacionarnih pretokov moči in napetosti v posameznih vozliščih.

V praksi je izračun in raziskava stacionarnih razmer največkrat uporabljen postopek pri analizi omrežij. Kljub nezahtevni izvedbi namreč nudi detajlen vpogled v vsakdanje obratovanje omrežja. S pregledom rezultatov tovrstnih analiz na preprost način ugotovimo električno najbolj obremenjena vozlišča omrežja, maksimalne padce napetosti in smeri pretokov moči oziroma vse izstopajoče lastnosti omrežja v nekem obratovalnem stanju. Rezultati so na voljo v numerični obliki in jih največkrat predstavimo s tabelami, iz katerih so razvidni tudi podatki o napetostnih nivojih omrežja, številu in vrsti priključenih elementov, skupni moči odjema ter moči morebitne lastne proizvodnje.

Konfiguracija normalnega obratovalnega stanja obravnavanega modela omrežja je določena s povezavami prikazanimi na sliki 1. Z izračunom stacionarnih razmer ugotovimo, da napetosti v vozliščih omrežja ustrezajo zahtevam, določenim s kakovostjo električne energije [2]. Najnižja napetost je 0,975 pu na zbiralki 6 (Zb6). Celoten odjem omrežja je 9,72 MW in 1,75 MVar, pri čemer ocenjene izgube pomenijo 0,3%. Del odjema pokrijemo z generatorji lastne proizvodnje (4,28 MW). Napetostne razmere posameznih vozlišč so podane v tabeli 1.

Vozlišče	Un [kV]	U [p.u.]	odjem [MW] / [MVar]	Št. odvodov
Zb1	6	0,978	6,78 / 0,55	3
Zb2	6	0,978	4,27 / 1,7	3
Zb3	6	0,977	6,45 / 4,41	20
Zb4	6	0,977	0,32 / 0,11	1
Zb5	6	0,978	0,042 / 0,032	1
Zb6	6	0,975	1,49 / 0,71	6
Zb7	6	0,976	0,45 / 0,16	2
Zb8	6	0,996	0,36 / 0,32	2
Dovod	35	1,000	5,45 / 0,045	2

Tabela 1: Izračun pretokov moči in napetosti
Table 1: Load flow calculation results

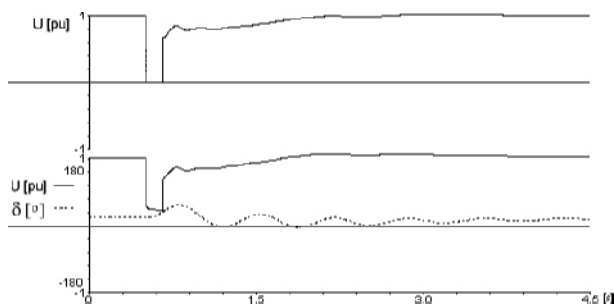
6.2 Razmere v času kratkih stikov

Z analizo kratkostičnih razmer podamo upravljavcu omrežja karakteristične lastnosti odziva omrežja pri različnih kratkih stikih (k.s.). Zato zajamemo vrsto k.s., ki so v obravnavanem omrežju pogost pojav in imajo posredno največje ekonomske posledice ter morebitne spremljajoče pojave, ki so značilni za omrežja z določeno strukturo [3]. Ker so k.s. časovno odvisni pojavi, je rezultate analize smiselno predstaviti tako numerično kot grafično, pri čemer pri prvih še posebej poudarimo maksimalne vrednosti opazovanih veličin. Diagrame izberemo v smislu najboljšega prikaza dinamike celotnega prehodnega pojava, pri čemer je

priporočljivo podati napetostne razmere na izpostavljenih vozliščih, nihanja v obratovanju strojev, dinamiko kratkostičnega toka in pretokov moči. Pri obravnavi enopolnih zemeljskih stikov, dvopolnih stikov in dvopolnih zemeljskih stikov je veličine smiselno prikazati s trenutnimi vrednostmi, medtem ko pri analizah tripolnih kratkih stikov uporabimo prikaz na podlagi efektivnih vrednosti.

Kratki stiki so pogosti v elektroenergetskih omrežjih. Čeprav sta gostota in vrsta kratkih stikov odvisni od številnih parametrov, številne izkušnje in študije, s področja proučevanja tovrstnih okvar, poudarjajo enopolni zemeljski stik (e.z.s.) kot najpogostejšo vrsto kratkega stika ter tripolni kratki stik (t.k.s.) kot najneugodnejšo vrsto kratkega stika. Na tej podlagi je omenjeni vrsti kratkih stikov smiselno izbrati tudi kot osnovo raziskav kratkostičnih razmer v industrijskih omrežjih. Vpliv kratkih stikov na razmere v omrežju je odvisen predvsem od načina ozemljevanja omrežij. V omrežjih z izoliranim zvezdiščem transformatorjev, kot je to v našem primeru, e.z.s. ne pomeni večje nevarnosti za omrežje. Pojavu sicer sledi karakteristično povišanje napetosti zdravih faz na približno $\sqrt{3} \cdot U_n$, vendar je zaradi izoliranega vozlišča zemljskotični tok majhen in ne preseže 15 A. Z ustreznimi vezavami transformatorjev pa je obratovanje omrežja kljub pojavu še vedno mogoče [4]. Zato večina industrijskih omrežij še danes obratuje z izoliranimi zvezdišči transformatorjev.

Nasprotno od e.z.s. pa t.k.s. povzroči znatnejšo gmotno škodo in navadno tudi prekinitve obratovanja. Še posebno to velja pri t.k.s. v glavnem napajalnem ali razdelilnem vozlišču omrežja. V modelu omrežja t.k.s. simuliramo na glavni zbiralki z oznako Zb1 (slika 1). Kratek stik na izbrani lokaciji povzroči trenutni upad napetosti v celotnem omrežju, zato je moteno obratovanje vseh porabnikov, prav tako pa vpliva na obratovanje povezanih generatorjev. Če t.k.s. ni dovolj hitro odstranjen, lahko povzroči nekontrolirano pospeševanje rotorjev generatorjev, ki se lahko konča s prehodom obratovanja v nestabilno območje. V obravnavnem primeru simuliramo t.k.s., ki traja 150 ms. Napetostne razmere so podane na sliki 2.



Slika 2: Tripolni kratki stik na zbiralki Zb1
Figure 2: Three phase short circuit on node Zb1

Na sliki 2 je na prvem diagramu prikazan časovni potek efektivne napetosti na okvarjeni zbiralki 1 (Zb1), na drugem diagramu pa so prikazane napetostne razmere na priključnem vozlišču električno najbližjega generatorja G6. Poleg napetosti je prikazan tudi časovni potek rotorskega kota generatorja. Iz karakteristike slednjega je mogoče ugotoviti, da izbrana dolžina t.k.s. ne pomeni nevarnosti za prehod v nestabilno obratovanje.

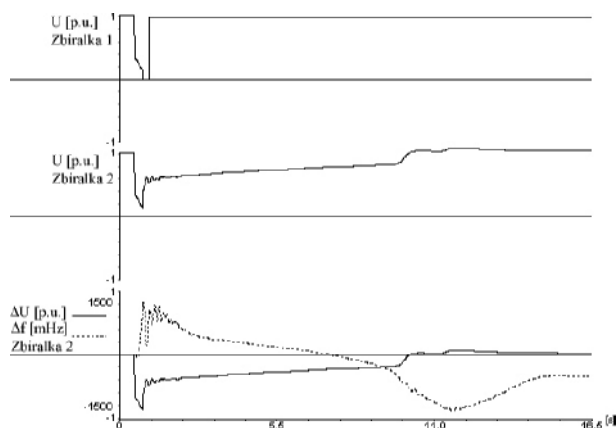
6.3 Prehod v otočno obratovanje

Če lahko industrijska omrežja z lastno proizvodnjo električne energije omogočijo neodvisno in nemoteno napajanje dela odjema, velja da so sposobna zagotoviti otočno obratovanje omrežja. Na splošno ima povezano obratovanje industrijskega omrežja z javnim omrežjem številne prednosti, zato je otočno obratovanje industrijskih omrežij priporočljivo le v izrednih primerih in ni pogost ukrep. Največkrat takšno obratovanje nastane kot posledica defektnih stanj v javnem omrežju ali v času planiranih vzdrževalnih del.

Analizo prehoda omrežja v otočno obratovanje navadno sestavljajo ugotovitve več ločenih raziskav. Z njimi zajamemo vzroke in pogoje za prehod v otočno obratovanje, obratovalne lastnosti bremen in generatorjev v času tovrstnih dinamičnih sprememb, razmerje pretokov moči v otočnem obratovanju in vrednosti časovnih parametrov prehoda. Dinamiko dogodka dodatno spremljamo tudi na podlagi časovnih sprememb frekvence in napetosti. Na podlagi oscilacij frekvence določimo območje njene deviacije in čas, potreben za vrnitev v standardno predpisane vrednosti, na podlagi sprememb napetosti pa ugotavljamo morebitno napetostno nestabilnost. V močno obremenjenih omrežjih lahko namreč prehod v otočno obratovanje povzroči napetostno nestabilnost v otoku. V tem primeru ugotovimo vzroke za nestabilnost, predlagamo smiselne rešitve in ukrepe ter jih z dodatnimi simulacijami tudi preizkusimo. Rezultate vseh simulacij in analize prehoda podamo z diagrami, iz katerih je nazorno razvidna dinamika celotnega dogodka oziroma prehodnega pojava.

Ker lahko defektna stanja v zunanjem omrežju povzročijo dinamične pojave, ki jim sledi izklop generatorjev lastne proizvodnje, mora biti prehod v otočno obratovanje hiter in s stališča obratovanja omrežja nezaznaven. V nekaterih primerih namreč že sam prehod v otočno obratovanje povzroči prehodni pojav, ki je lahko vzrok za težave v obratovanju generatorjev oziroma bremen v otočnem delu omrežja. Najdaljši dovoljeni čas prehoda je glede na konstrukcijske lastnosti omrežij različen, na splošno pa je omejen z mejo stabilnega obratovanja generatorjev. Za izbrano konfiguracijo modela omrežja v otočnem obratovanju je ugotovljena meja stabilnosti generatorjev 240 ms.

Simulacija prehoda na modelu omrežja v otočno obratovanje obsega zaporedje več dogodkov. Začne se s tripolnim kratkim stikom v javnem omrežju, ki povzroči nezaželene spremembe v industrijskem omrežju in prehod dela omrežja v otočno obratovanje. Otok tvorijo bremena, priključena na zbiralki Zb 3 in Zb 6 ter generatorji na zbiralkah Zb 6, Zb 8 in Zb 9. Skupna moč odjema je 7,8 MW in 5,0 MVar. Dinamika razmer v času prehoda je prikazana na sliki 3.



Slika 3: Prehod v otočno obratovanje

Figure 3: Islanding of part of the power network model

Ob okvari napetost v celotnem omrežju najprej hipno pade na približno 30% nazivne vrednosti (slika 3, diagrama 1 in 2). Nato se ob razklopu sklopnega polja in prehodu v otočno obratovanje napetost na zbiralki Zb1 še dodatno zniža, medtem ko se napetostne razmere v delu omrežja, ki je prešel v otočno obratovanje začnejo normalizirati. Na zbiralki 2 (Zb2) napetost ponovno doseže nazivno vrednost po 10 s. V otočnem obratovanju frekvenco otoka vzdržujejo generatorji lastne proizvodnje oziroma predvsem parni generator G6. Frekvenca v času okvare in preklopa sklopnega polja močno zaniha, vendar se po prehodu v otočno obratovanje, po približno 11 s, ustali na vrednosti 49,5 Hz. Deviacija frekvence in napetosti v delu omrežja v otočnem obratovanju je prikazana na diagramu 3.

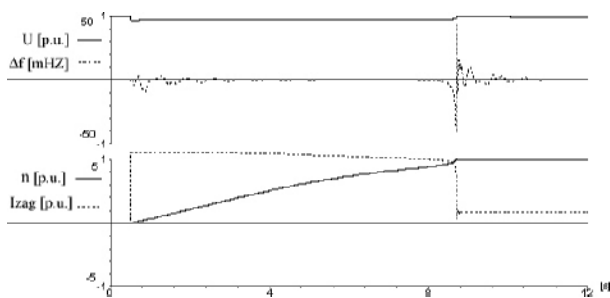
6.4 Zagon enega ali več motorjev

Analiza obratovanja motorjev spada v sklop obveznih simulacij pri obravnavah industrijskih omrežij. Obsegati mora skrajne primere v njihovem obratovanju in podati njihov vpliv na razmere v preostalem omrežju. Dnevno obratovanje različnih pogonskih strojev namreč močno obremenjuje inštalacije industrijskih omrežij. Nenehno prilagajanje obratovanja proizvodnim procesom oziroma njihova regulacija v omrežju povzroča napetostne oscilacije in nihanja pretokov moči, ki lahko vplivajo tudi na obratovanje drugih elementov v omrežju.

Največja nihanja povzročijo zagoni električnih motorjev. Med zagonom motorji namreč iz omrežja zahtevajo precej večji tok od nazivnega, ki je pretežno induktiven. Takšnemu povečanju toka navadno sledi karakteristični upad napetosti, ki lahko v slabo konstruiranih omrežjih bodisi podaljša čas zagona motorjev bodisi povzroči nepravilno delovanje povezanih napetostno občutljivih naprav. Zato danes zagon motorjev izvajamo posredno, tj. z omejevanjem zagonskega toka. Kljub temu pa je s simulacijami še vedno smiselno preveriti posledice morebitnih direktnih zagonov enega ali več motorjev hkrati. S tovrstnim preskusom lahko namreč ugotovimo specifične odzivne lastnosti omrežja pri skočni spremembi obremenitve in posledično nastala nihanja veličin.

Z analizo zagona motorjev ugotovimo maksimalni zagonski tok izbranega števila motorjev, mejne vrednosti deviacije napetosti, čas prehodnega pojava veličin in končno obratovalno točko posameznega motorja. S simulacijami lahko poleg numeričnih rezultatov podamo še diagrame časovnega poteka priključne napetosti in toka, morebitna deviacijo frekvence in trenutne spremembe vrtljajev motorjev.

V obravnavanem omrežju simuliramo razmere pri zagonu dveh motorjev priključenih na 6 kV zbiralko Zb 3. Pri simulacijah zagona izhajamo iz normalnega obratovalnega stanja omrežja, ki obratuje brez dveh izbranih motorjev. Med simulacijo nato motorja povežemo z omrežjem in s tem izvedemo direkten zagon. Zagon spremljamo z opazovanjem vrtljajev motorja, potekom zagonskega toka in napetosti na priključnem vozlišču ter deviacijo frekvence. Razmere ob zagonu so prikazane na sliki 4.



Slika 4: Zagon motorjev na zbiralki 3 (Zb3)
Figure 4: Startup of two 6kV motors on node Zb3

Z analizo razmer ugotovimo, da v obravnavanem omrežju direkten zagon motorjev ne povzroči bistvene spremembe obratovalnih razmer. Opazimo manjši upad napetosti na priključni zbiralki in pričakovano povečanje napajalnega toka. Zagon ne povzroči večjih odstopanj v zahtevani kakovosti električne energije in tako ne pomeni nevarnosti za ohranitev obratovalnih razmer omrežja.

7 Sklep

Analize industrijskih omrežij ni mogoče standardizirati. Zaradi raznolikosti topologije, porabniške strukture in režimov obratovanja je treba posamezno industrijsko omrežje obravnavati individualno, s poudarkom na raziskavah specifičnih lastnosti omrežja. Vseeno pa je na podlagi izkušenj mogoče podati smernice za tovrstne raziskave, ki so lahko podlaga za izvedbo in prikaz rezultatov analiz bodisi najpogostejših bodisi izrednih stanj omrežij. V članku smo obravnavali le nekaj izmed mnogih stanj podanega omrežja. Stanja smo na kratko analizirali in končali s predlogi o načinu in končni podobi izvedene analize. Podani primeri so najpogosteje predmet analiz obratovanja industrijskih omrežij, vsekakor pa jih je v vsakdanjih raziskavah treba dopolniti še z analizami specifičnih obratovalnih stanj.

8 Literatura

- [1] U. Kerin, "Ocena dinamične sigurnosti s simulacijskim programom NETOMAC", Diplomsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, September 2004
- [2] SIST EN 50160:2000 "Značilnosti napetosti v javnih razdelilnih omrežjih", standard.
- [3] U. Kerin, G. Bizjak, P. Žunko "Intermitirajoči zemeljski stik v razdelilnih SVN omrežjih", prispevek na konferenci, ERK, September 2005
- [4] J. M. Nahman, "Uzemljenje neutralne tačke distributivnih mreža", Naučna knjiga Beograd 1980, pp 53-86.

Uroš Kerin je diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani (2004). Kot mladi raziskovalec je zaposlen v Laboratoriju za električna omrežja in naprave. Njegova področja raziskav obsegajo analizo in optimizacijo omrežij, dinamiko prehodnih stanj in kakovost električne energije v razdelilnih in prenosnih omrežjih.

Grega Bizjak je diplomiral, magistriral in doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani (v letih 1990, 1993 in 1997). Njegovo raziskovalno področje zajema modeliranje elementov elektroenergetskega sistema za potrebe digitalne simulacije s poudarkom na stikalnih aparatih ter simulacije prehodnih pojavov v industrijskih omrežjih.

Peter Žunko je diplomiral, magistriral in doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani (v letih 1965, 1974 in 1978). Leta 1990 je postal redni profesor na Katedri za elektroenergetske sisteme in naprave. Njegovo raziskovalno delo zajema naprave za transformacijo in prenos električne energije, stikalno tehniko in analizo prehodnih pojavov v normalnih in defektnih stanjih v električnih omrežjih