

dr.sc. Srđan Žutobradić
mr.sc. Lahorko Wagmann
dr.sc. Milan Puharić
Hrvatska energetska regulatorna agencija

R2

STRATEGIJA UVOĐENJA SUSTAVA MREŽNOG TON-FREKVENCIJSKOG UPRAVLJANJA (MTU) U MREŽU 110 kV HEP-a

SAŽETAK

U referatu su prikazane mogućnosti uvođenja sustava MTU na 110 kV. Opisan je frekvencijski ovisan model mreže za proračun širenja MTU signala. Prezentirani su dosadašnji rezultati proračuna širenja MTU signala u mreži 110 kV te rezultati pripadajućih mjerenja. Dana je tehno-ekonomska usporedba primjene MTU-a s utiskivanjem signala u mrežu srednjeg napona i u mrežu 110 kV. Na kraju su dani prijedlozi za daljnju implementaciju MTU sustava u Hrvatskoj.

Ključne riječi: mrežno ton-frekvencijsko upravljanje, proračun širenja MTU signala

IMPLEMENTATION STRATEGY OF THE RIPPLE CONTROL IN THE HEP 110 kV NETWORK

SUMMARY

In the paper the possibilities of the ripple control system implementation at the 110 kV level are presented. Frequency dependent network model for the calculation of ripple signal penetration is described. Recent results of the signal penetration calculation in the 110 kV network and the results of correspondent measurement are presented. Technical and economical comparison between application of the ripple control injection at the medium voltage level and 110 kV level is given. In the conclusion the further way of the ripple control system implementation in Croatia is proposed.

Key words: ripple control, calculation of the penetration of the ripple control

1. UVOD

Mrežno tonfrekvencijsko upravljanje (MTU) jedna je od najrasprostranjenijih metoda za upravljanje brojilima ali i opterećenjem u elektrodistribucijskom sustavu. Poznato je da korištenje MTU-a omogućava upravljanje višetarifnim brojilima na bitno ekonomičniji i fleksibilniji način u odnosu na uklopne satove. MTU se u nas primjenjuje u vrlo ograničenom opsegu, za upravljanje trošilima. Treba naglasiti da bi se takva mogućnost ubuduće trebala više koristiti.

U Hrvatskoj postoji sustav MTU s injektiranjem na sredjonaponskoj razini. Situacija se tek nedavno promijenila ugradnjom dvaju postrojenja na 110 kV, jednog u Zagrebu (TS Botinec) i jednog u Splitu (TS Vrboran). Iako je MTU postrojenje na 110 kV skuplje od postrojenja na srednjem naponu, omogućava pokrivanje signalom puno većeg dijela mreže. Uzevši u obzir i to da MTU sustav nije prisutan

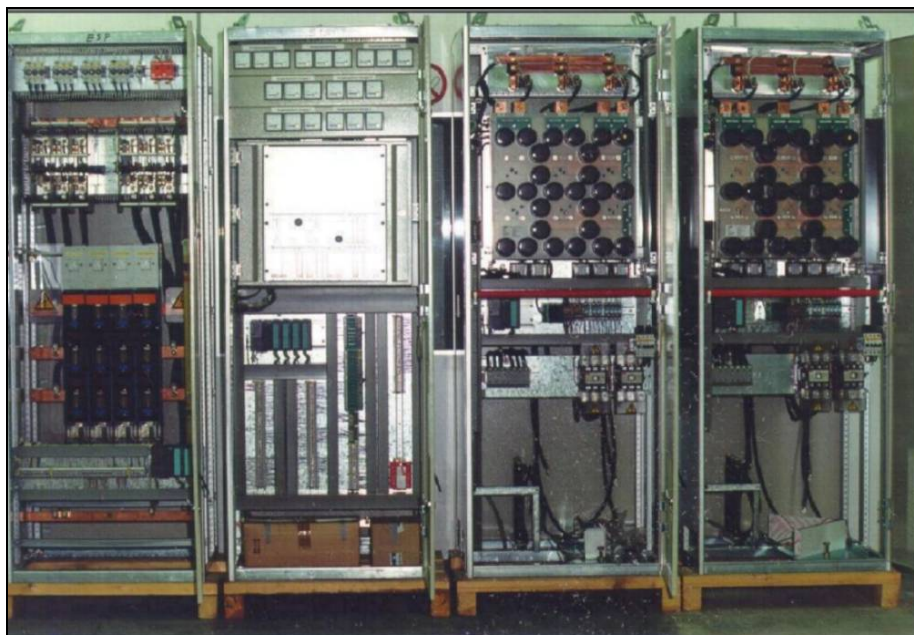
u svim dijelovima RH u ovom se referatu analizira mogućnost implementacije MTU-a na čitavom području Hrvatske na naponskoj razini 110 kV.

2. NAČELO RADA MTU SUSTAVA

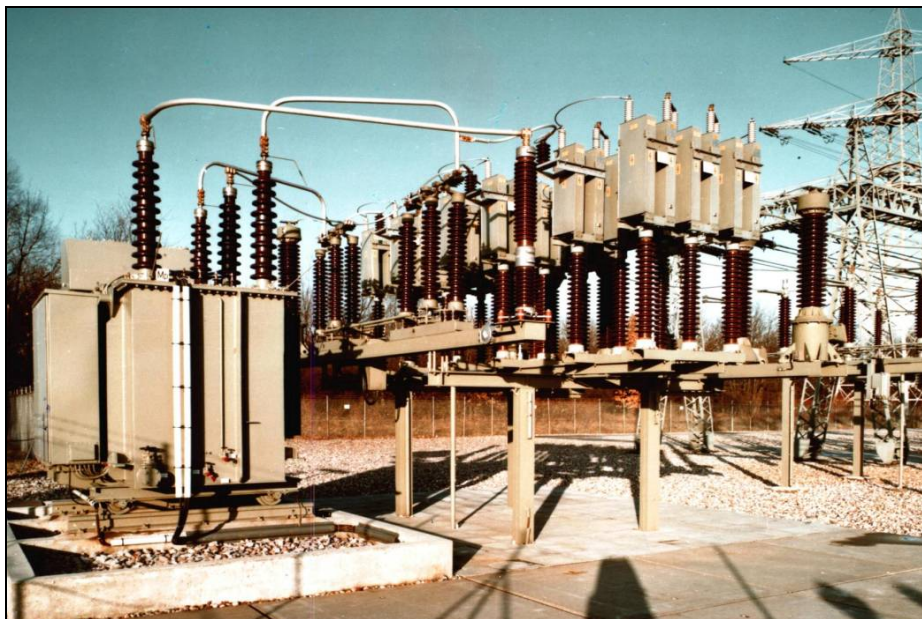
Načelo rada MTU slično je širenju radio signala s tom razlikom što se za prijenos signala koristi elektroenergetska mreža. Tonfrekvencijski signal utiskuje se u mrežu pomoću odgovarajućih spojnih filtara. Utiskivanje signala može se ostvariti paralelnim ili serijskim spojem na mrežu na visokom, srednjem ili niskom naponu, a signal se širi po čitavoj mreži. Kodirani signal može se primiti u svakoj točki mreže, a uz pomoć posebnih prijemnika ga se dekodira i prevodi u odgovarajuće upravljačke sklopne operacije. Izbor naponske razine za utiskivanje signala (od 110 kV do 0,4 kV) ovisi o ekonomskim i pogonskim okolnostima. Značajke utisnog postrojenja određuju računalom podržanim proračunima širenja tonfrekvencijskog signala. Taj je način važan zbog predviđanja eventualnih ponora signala (npr. paralelni filtri za prigušenje harmonika). Uvođenjem MTU ne utječe se niti smanjuje mogućnost normalnog pogona distribucijske mreže, ukoliko se ostane unutar okvira zadanih odgovarajućim normama. MTU signal utiskuje se pomoću filtra podešenog na odabranu frekvenciju, koji također služi i za galvansko odvajanje MTU odašiljača od mreže, u cilju smanjenja utjecaja mreže na odašiljač.

2.1. Postrojenja MTU na 110 kV

Ovisno o zahtjevima, utiskivanje se može obavljati paralelnim ili serijskim spojem. Obje vrste spojeva pogodne su za utiskivanje signala na srednjem ili visokom naponu. Paralelni spoj se koristi za više frekvencije, dok se serijski spoj koristi za frekvencije niže od 217 Hz. Na sljedećim slikama prikazani su odašiljač za 110 kV postrojenje (Slika 1) i 110 kV MTU polje (Slika 2).



Slika 1. Odašiljač za 110 kV postrojenje

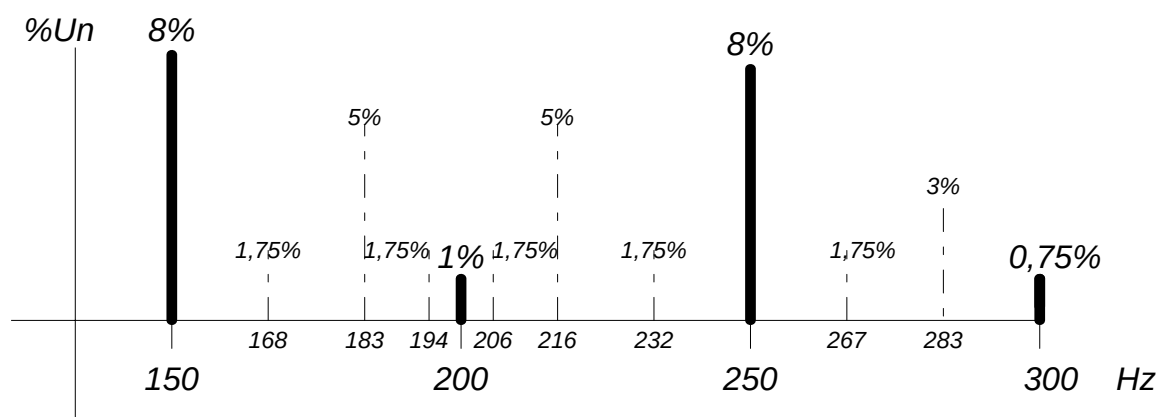


Slika 2. Primjer 110 kV MTU polja

2.2. Izbor frekvencije za utiskivanje

Pravilan odabir frekvencije MTU signala važan je moment pri projektiranju novog MTU sustava i kada se jednom utvrdi ne može se više jednostavno mijenjati. Pri odabiru frekvencija valja se pridržavati niza preporuka koja su, grubo navodeći, slijedeća:

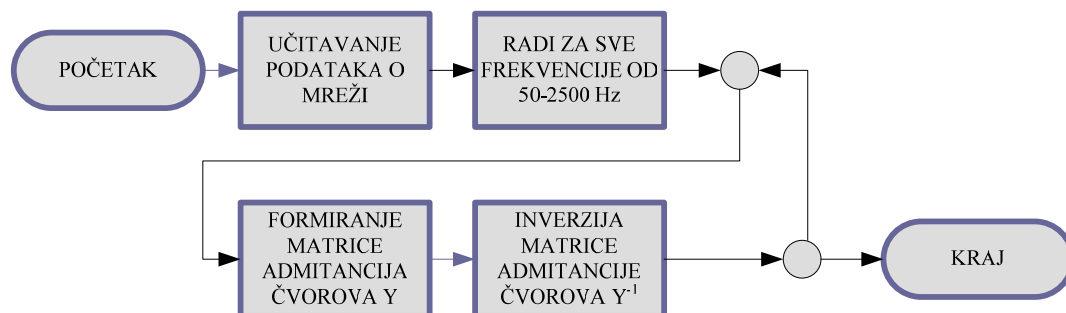
- Praksa je pokazala da su sustavi s nižim frekvencijama pouzdaniji u radu od sustava s frekvencijama višim od 500 Hz,
- MTU signali nižih frekvencija imaju manje slabljenje u mreži,
- Niže frekvencije su pogodnije za serijski tip utiskivanja naročito ispod 300 Hz,
- Kod izbora frekvencije prednost treba dati frekvenciji različitoj od frekvencija na kojima rade susjedni MTU sustavi.
- Frekvenciju MTU signala treba izabrati različitu od višekratnika 50 Hz,
- MTU signal treba biti na frekvenciji različitoj od postojećih izraženih harmonika u mreži,
- U slučaju dvojbe između dvije ravnopravne frekvencije, prednost treba dati nižoj frekvenciji koja teži boljem prostiranju i većem dometu MTU signala u mreži,
- Potrebno je voditi računa o frekvencijama MTU signala u susjednim državama odnosno područjima, u cilju izbjegavanja međusobnih smetnji ili krivih prorada MTU prijemnika.



Slika 3. Grafički prikaz rezerviranih standardnih frekvencija kao i dozvoljene razine harmoničnih izobličenja na naponskoj razini 0,4 kV.

3. OPIS PROGRAMA ZA PRORAČUN ŠIRENJA MTU SIGNALA

Proračun širenja MTU signala radi se u zbog određivanja značajki MTU postrojenja, odabira najpovoljnije lokacije odašiljača u mreži, procjene pokrivenosti mreže MTU signalom, ocijene utjecaja pojedinih parametara elektroenergetskog sustava. Za proračun širenja MTU signala u elektroenergetskoj mreži potrebne su dvije vrste proračuna. Prva je proračun frekvencijskog odziva mreže, kod kojeg se računa matrica impedancija čvorova za sve frekvencije od 50 Hz do 2500 Hz u koracima od po 10 Hz (Slika 4).



Slika 4. Dijagram toka programa za proračun frekvencijskog odziva mreže

Proračunom frekvencijskog odziva mreže dobiva se za svaki čvor ovisnost iznosa i kuta Theveninove impedancije o frekvenciji, temeljem koje je moguće nacrtati anvelopu vektora impedancije u dijagramu s realnom i imaginarnom koordinatom, takozvani locus dijagram. Matrična jednadžba prema kojoj se računa Theveninova impedancija je:

$$\mathbf{Z}_f = \mathbf{Y}_f^{-1}, \quad f = 50, 60, \dots, 3000 \text{ Hz} \quad (1)$$

gdje su:

- $\mathbf{Z}_f$ - matrica impedancija čvorova za frekvenciju f , Ω
- $\mathbf{Y}_f$ - matrica admitancija čvorova za frekvenciju f , S
- f - frekvencija, Hz

Drugim riječima do Theveninovih impedancija čvorova dolazi se inverzijom matrice admitancija, koja se dobiva koristeći prvi Kirchhoff-ov zakon, postavljanjem jednadžbi za sve čvorove promatrane mreže.

$$\begin{aligned} \mathcal{Y}_{11} \cdot \mathcal{V}_1 + \mathcal{Y}_{12} \cdot \mathcal{V}_2 + \dots + \mathcal{Y}_{1n} \cdot \mathcal{V}_n &= \mathcal{I}_1 \\ \mathcal{Y}_{21} \cdot \mathcal{V}_1 + \mathcal{Y}_{22} \cdot \mathcal{V}_2 + \dots + \mathcal{Y}_{2n} \cdot \mathcal{V}_n &= \mathcal{I}_2 \\ &\dots\dots\dots \\ \mathcal{Y}_{n1} \cdot \mathcal{V}_1 + \mathcal{Y}_{n2} \cdot \mathcal{V}_2 + \dots + \mathcal{Y}_{nn} \cdot \mathcal{V}_n &= \mathcal{I}_n \end{aligned} \quad (2)$$

gdje su:

- n - broj čvorova u mreži
- $\mathcal{Y}_{ij}$ - admitancija između čvorova i i j , S
- $\mathcal{V}_i$ - napon i -tog čvora prema referentnom čvoru, V
- $\mathcal{I}_i$ - struja i -tog čvora, A

Struje $\mathcal{I}_1, \dots, \mathcal{I}_n$ jednake su nuli osim u čvoru u kojem je MTU postrojenje. Naponi čvorova $\mathcal{V}_1, \dots, \mathcal{V}_n$ su naponi MTU signala koji se određuju rješavanjem sustava n jednadžbi s n nepoznanica. Jednadžba za referentno čvorište je zavisna jednadžba, linearna kombinacija ostalih te se ne ispisuje. U trofaznoj mreži uobičajeno je da referentni čvor bude nula sustava. Kod proračuna mreže računalima, praktično je jednadžbe mreže (2) napisati u matričnom obliku.

$$\begin{pmatrix} \mathcal{I}_1 \\ \mathcal{I}_2 \\ \vdots \\ \mathcal{I}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathcal{Y}_{11} & \mathcal{Y}_{12} & \dots & \mathcal{Y}_{1n} \\ \mathcal{Y}_{21} & \mathcal{Y}_{22} & \dots & \mathcal{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathcal{Y}_{n1} & \mathcal{Y}_{n2} & \dots & \mathcal{Y}_{nn} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \mathcal{V}_1 \\ \mathcal{V}_2 \\ \vdots \\ \mathcal{V}_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

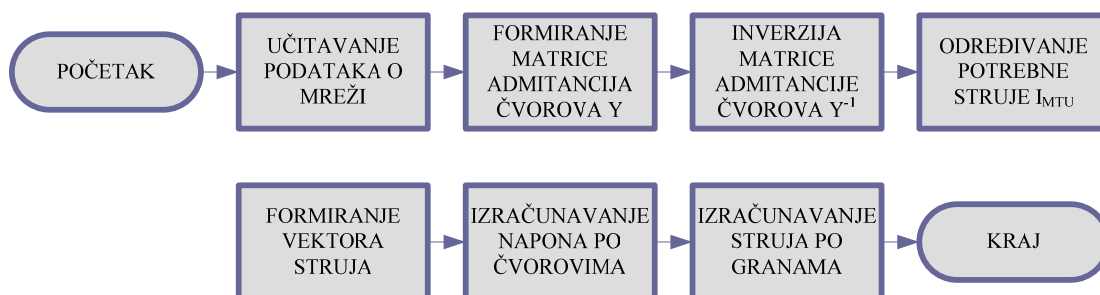
Gornja jednačba se simbolički piše kao:

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y} \times \mathbf{V} \quad (4)$$

Matrica admitancija čvorišta $\mathbf{Y}$ je kvadratna matrica $n \times n$, gdje je n broj nezavisnih čvorišta u mreži. Članovi matrice admitancije čvorova dobivaju se na sljedeći način:

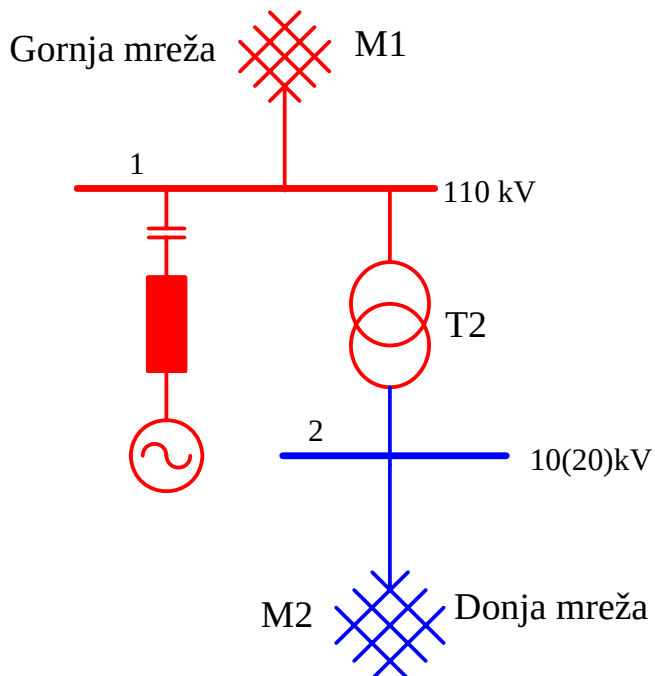
- dijagonalni član matrice admitancije čvorišta y_{ii} , $i = 1, 2, \dots, n$, jednak je sumi admitancija grana koje su vezane za i -to čvorište te se naziva vlastita admitancija čvorišta,
- izvandijagonalni član matrice admitancije čvorišta y_{ij} , $i=1, 2, \dots, n$, $j=1, 2, \dots, n$, $i \neq j$, jednak je negativnoj admitanciji grane koja povezuje čvorište i s čvorištem j .

Druga vrsta proračuna je analiza širenja MTU signala i određivanje njegove razine u svakom čvoru elektroenergetske mreže. Dijagram toka za proračun širenja MTU signala u elektroenergetskoj mreži prikazan je na sljedećoj slici (Slika 5).



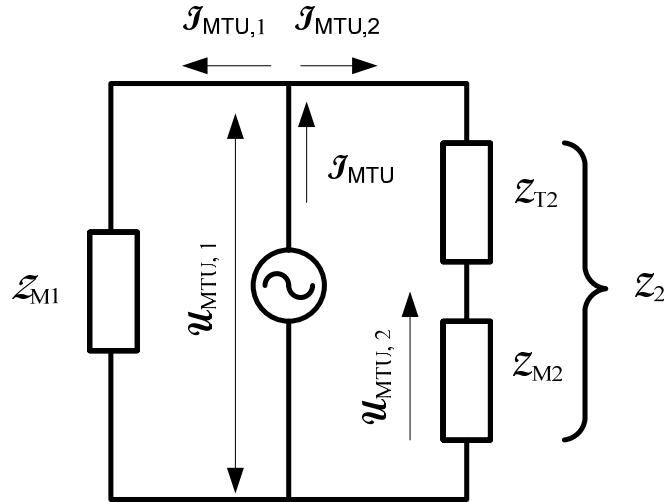
Slika 5. Dijagram toka programa za širenje MTU signala

Ovim se proračunom prvo izračunava Theveninova impedancija mreže čvora u kojem se nalazi MTU postrojenje. Na temelju željene razine signala i Theveninove impedancije čvora izračunava se potrebni iznos struje MTU odašiljača, odnosno potrebna snaga postrojenja. Načelna shema utiskivanja MTU signala na 110 kV prikazana je na sljedećoj slici (Slika 6).



Slika 6. Utiskivanje MTU signala na 110 kV

Gornja se shema može nadomjestiti pomoću impedancija kao na sljedećoj slici (Slika 7).



Slika 7. Model proračuna MTU signala

Ukoliko je razina signala određena u postocima potrebna struja signala određuje se na sljedeći način:

$$I_{MTU} = \frac{u_{MTU\%}}{100} \frac{U}{\sqrt{3}Z_{uk}}, \quad \Omega \quad (5)$$

gdje su:

- $u_{MTU\%}$ - zadana jačina signala u % nominalnog napona
- U - referentni napon, kV
- Z_{uk} - ukupna impedancija mreže, Ω

Ukupna impedancija mreže u kompleksnom obliku određena je izrazom:

$$Z_{uk} = \frac{Z_{M1} \cdot Z_2}{Z_{M1} + Z_2}, \quad \Omega \quad (6)$$

$$Z_2 = Z_T + Z_{M2}, \quad \Omega \quad (7)$$

gdje su:

- Z_{T2} - Impedancija transformatora napona, Ω
- Z_{M1} - Impedancija mreže višeg napona, Ω
- Z_{M2} - Impedancija mreže nižeg napona, Ω

Struja MTU signala jednaka je zbroju struja koje odlaze u mrežu višeg i mrežu nižeg napona:

$$I_{MTU} = I_{MTU,1} + I_{MTU,2}, \quad A \quad (8)$$

Omjer struja obrnuto je proporcionalan omjeru ukupnih impedancija mreže višeg i mreže nižeg napona.

$$\frac{|I_{MTU,1}|}{|I_{MTU,2}|} = \frac{|Z_2|}{|Z_1|} \quad (9)$$

Budući da je ukupna impedancija mreže višeg napona dosta niža od ukupne impedancije mreže nižeg napona, većina signala odlazi u mrežu višeg napona. Impedancija mreže Z_{M2} smanjuje se s porastom opterećenja, što znači da će omjer struja biti povoljniji pri većem opterećenju mreže, ali će i potrebna snaga utiskivanja biti veća. Potrebna snaga utiskivanja izračunava se pomoću formule:

$$S_{MTU} = \sqrt{3} \cdot |u_{MTU}| \cdot |I_{MTU}|, \quad \text{kVA} \quad (10)$$

Tako izračunata struja uvrštava se u matičnu jednadžbu (3) i nakon njezinog rješavanja, dobivaju se iznosi razina napona MTU signala po svim čvorovima u elektroenergetskoj mreži. Invertiranjem matrice admitancija čvorova i množenjem s vektorom struja dobivaju se vrijednosti napona u svim čvorovima.

$$\mathbf{I} \times \mathbf{Y}^{-1} = \mathbf{V} \quad (11)$$

Ukoliko se unaprijed zna snaga MTU odašiljačkog postrojenja moguće je u proračunu zadati struju MTU signala (npr. 150 A na 110 kV). To znači da ukoliko se željena razina signala postavi previsoko, a izračunata potrebna struja odašiljača bude viša od najveće zadane struje, program će MTU signal izračunati uz zadano ograničenje struje.

Struje u granama računaju se na sljedeći način:

$$\mathcal{I}_{ij} = (\mathcal{V}_i - \mathcal{V}_j) \cdot \mathcal{Y}_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad i \neq j \quad (12)$$

gdje su:

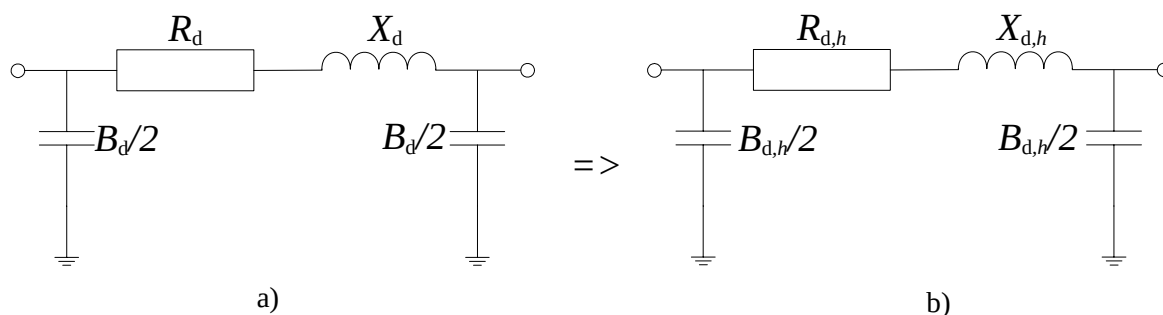
- $\mathcal{V}_i$ - napon u i-tom čvoru, V
- $\mathcal{V}_j$ - napon u j-tom čvoru, V
- $\mathcal{Y}_{ij}$ - admitancija promatrane grane, A
- i, j - indeks čvorova
- n - broj čvorova

4. MODELIRANJE MREŽE ZA PRORAČUN ŠIRENJA MTU SIGNALA

Za proračun širenja MTU signala potrebno je imati nadomjesnu shemu mreže koja uvažava frekvencijsku ovisnost realnih i imaginarnih dijelova impedancije pojedinih elemenata mreže, slično kao i kod proračuna širenja harmonika. Pri promatranju širenja MTU signala uobičajeno je mrežu modelirati u direktnom sustavu simetričnih komponenta.

4.1. Nadzemni vodovi i kabeli

Nadzemni vodovi i kabeli se na nazivnoj frekvenciji nadomještaju konvencionalnom π -shemom, koja sadrži radni i jalovi induktivni otpor serijski spojen između dva čvora, uz poprečno spojene kapacitete (Slika 8 a).



Slika 8. Nadomjesna shema voda

Na frekvencijama višim od nazivne, parametri voda mijenjaju se na sljedeći način:

$$R_{d,h} = \sqrt{h} \cdot R_d, \quad \Omega/\text{km} \quad (13)$$

$$X_{d,h} = h \cdot X_d, \quad \Omega/\text{km} \quad (14)$$

$$B_{d,h} = h \cdot B_d, \quad \text{S/km} \quad (15)$$

gdje su:

- R_d - jedinični radni otpor voda u direktnom sustavu, Ω/km
- X_d - jedinična uzdužna reaktancija voda u direktnom sustavu, Ω/km
- B_d - jedinična poprečna susceptancija voda u direktnom sustavu, S/km

Uzdužna impedancija cijele duljine promatranog voda u direktnom iznosi (Slika 8 b):

$$\mathcal{Z}_{d,h} = l \cdot R_{d,h} + j \cdot l \cdot X_{d,h} = l \cdot \sqrt{h} \cdot R_d + j \cdot l \cdot h \cdot X_d, \quad \Omega/\text{km} \quad (16)$$

gdje su:

- l - duljina voda, km
- h - omjer promatrane i nazivne frekvencije

Poprečna admitancija cijele duljine voda također se mijenja u ovisnosti o frekvenciji na sljedeći način:

$$\frac{\mathcal{Y}_{d,h}}{2} = j \cdot l \cdot \frac{B_{d,h}}{2} = j \cdot l \cdot h \cdot \frac{B_d}{2}, \quad \text{S/km} \quad (17)$$

4.2. Model dugog voda

Kod dugih vodova na frekvencijama višim od nazivne, zbog valnog karaktera struje i napona, model voda s koncentriranim parametrima više ne zadovoljava. U takvim slučajevima vod se nadomješta s nekoliko serijski spojenih π -shema. Na taj način dobivaju se točnije vrijednosti napona i struja u proračunu. Tri π -sheme daju točnost do 1,2% za četvrtinu valne duljine (1500 km za 50 Hz). S porastom frekvencije potreban broj π -shema proporcionalno raste. Vod od 300 km zahtijeva 30 π -shema da bi se postigla točnost od 1,2% za 50. harmonik. Blizu rezonantne frekvencije točnost modela drastično opada. Umjesto serijskog spajanja više π -shema, učinkovitije je računati s tzv. točnom, odnosno korigiranom π -shemom. Vrijednosti impedancije i admitancije u direktnom sustavu množe se korekcijskim faktorima:

$$\mathcal{Z}_{\pi,d,h} = \mathcal{Z}_{\pi,i,h} = \mathcal{Z}_{d,h} \frac{\text{sh} \theta_{d,h}}{\theta_{d,h}}, \quad \Omega \quad (18)$$

$$\frac{\mathcal{Y}_{\pi,d,h}}{2} = \frac{\mathcal{Y}_{\pi,i,h}}{2} = \frac{\mathcal{Y}_{d,h}}{2} \frac{\text{th} \frac{\theta_{d,h}}{2}}{\frac{\theta_{d,h}}{2}}, \quad \text{S} \quad (19)$$

gdje su:

- $\mathcal{Z}_{d,h}$ - uzdužna impedancija voda u direktnom sustavu na promatranoj frekvenciji, Ω
- $\mathcal{Y}_{d,h}$ - poprečna admitancija voda u direktnom sustavu na promatranoj frekvenciji, S
- θ - bezdimenzionalna veličina

Konstanta prodiranja ili valna konstanta voda na promatranoj frekvenciji iznosi

$$\gamma_{d,h} = \gamma_{i,h} = \sqrt{\mathcal{Z}_{d,h} \cdot \mathcal{Y}_{d,h}}, \quad 1/\text{km} \quad (20)$$

U računu je zgodno uzeti veličinu bez dimenzije:

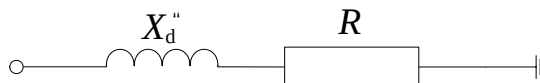
$$\theta = l \cdot \gamma \quad (21)$$

gdje je:

- l - duljina voda, km

4.3. Sinkroni strojevi

Sinkroni stroj se u proračunu nadomješta subtranzijentnom reaktancijom i radnim otporom spojenom između čvora na koji je sinkroni stroj priključen i neutralne točke.



Slika 9. Nadomjesna shema sinkronog stroja

Induktivni otpor sinkronog stroja na nazivnoj frekvenciji računa se pomoću formule:

$$X_d'' = \frac{X_d''}{100} \frac{U^2}{S_n}, \quad \Omega \quad (22)$$

gdje su:

- X_d'' - relativna direktna subtranzijentna reaktancija, %
- S_n - nazivna snaga sinkronog stroja, MVA
- U - referentni napon, kV

S porastom frekvencije induktivni otpor se mijenja prema formuli:

$$X_{d,h}'' = h \cdot X_d'' = h \cdot \frac{X_d''}{100} \frac{U^2}{S_n}, \quad \Omega \quad (23)$$

gdje je:

- h - omjer promatrane i nazivne frekvencije

Radni otpor sinkronog stroja na nazivnoj frekvenciji može se odrediti sa zadovoljavajućom točnošću iz sljedećih izraza [L.7]:

$$R = 0,05 \cdot X_d'' \text{ za } U_n > 1 \text{ kV i } S_n \geq 100 \text{ MVA}$$

$$R = 0,07 \cdot X_d'' \text{ za } U_n > 1 \text{ kV i } S_n < 100 \text{ MVA}$$

$$R = 0,15 \cdot X_d'' \text{ za } U_n \leq 1 \text{ kV}$$

Radni otpor u ovisnosti o frekvenciji mijenja se prema formuli [L.6]:

$$R_h = R \cdot (1 + 0,1 \cdot h^{1,5}), \quad \Omega \quad (24)$$

Za generatore s istaknutim polovima za inverznu reaktanciju vrijedi:

$$X_i'' = \frac{1}{2} (X_d'' + X_q''), \quad \Omega \quad (25)$$

gdje je:

- X_q'' – subtranzijentna poprečna reaktancija sinkronog stroja, Ω

Impedancija u direktnom sustavu na promatranoj frekvenciji iznosi:

$$\mathcal{Z}_{d,h} = \mathcal{Z}_{0,h} = R_h + j \cdot X_{d,h}'', \quad \Omega \quad (26)$$

Impedancija u inverznom sustavu na promatranoj frekvenciji iznosi:

$$\mathcal{Z}_{i,h} = R_h + j \cdot X_{i,h}'', \quad \Omega \quad (27)$$

4.4. Asinkroni strojevi

Asinkroni stroj se, kao i sinkroni, u proračunu nadomješta reaktancijom i radnim otporom spojenom između čvora na koji je asinkroni stroj priključen i neutralne točke (Slika 9). Impedancija asinkronog stroja na nazivnoj frekvenciji određuje se pomoću formule:

$$Z = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_{ks}} = \frac{I_n}{I_{ks}} \cdot \frac{U^2}{S_n}, \quad \Omega \quad (28)$$

gdje su:

- S_n - nazivna snaga asinkronog stroja, MVA
- U - referentni napon, kV
- I_{ks} - struja pokusa kratkog spoja asinkronog stroja, kA
- I_n - nazivna struja asinkronog stroja, kA

Radni otpor može se odrediti sa zadovoljavajućom točnošću iz sljedećih izraza [L.7]:

$$\frac{R}{X} = 0,10, X = 0,995 \cdot Z, \text{ kod VN strojeva, (snaga po jednom paru polova} \geq 1 \text{ MW)}$$

$$\frac{R}{X} = 0,15, X = 0,989 \cdot Z, \text{ kod VN strojeva, (snaga po jednom paru polova} < 1 \text{ MW)}$$

$$\frac{R}{X} = 0,30, X = 0,958 \cdot Z, \text{ kod NN strojeva}$$

S porastom frekvencije impedancija asinkronog stroja se mijenja prema formuli:

$$Z_{d,h} = \sqrt{h} \cdot R + j \cdot h \cdot X, \quad \Omega \quad (29)$$

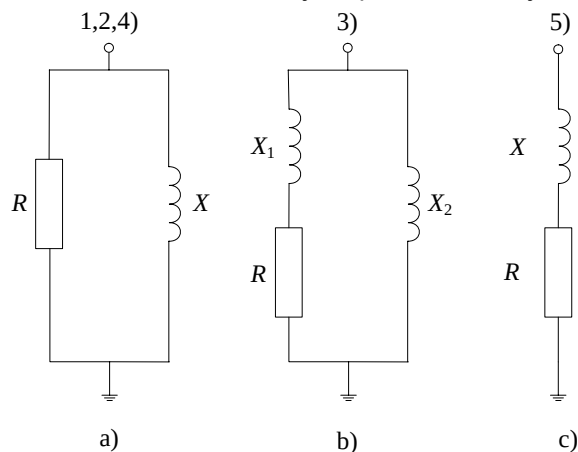
gdje su:

- R - radni otpor, Ω
- X - reaktivni otpor, Ω
- h - omjer promatrane i nazivne frekvencije

4.5. Modeliranje opterećenja

Model opterećenja ima vrlo velik utjecaj na točnost proračuna harmonika. Zbog toga što se u proračunu u nadomjesnoj shemi mreže javlja kao poprečni element, jako utječe na iznos Theveninove impedancije pa tako i na iznos izračunatih naponskih i strujnih harmonika. Iznos impedancije, kojim se opterećenje modelira opada s porastom opterećenja mreže.

U literaturi postoji nekoliko predloženih frekvencijski ovisnih modela tereta. Nadomjesne sheme tereta mogu predstavljati pojedinog potrošača ili grupu potrošača na sabirnicama. Postoje velike razlike u promjeni impedancije s frekvencijom kod industrijskih potrošača i kućanstava. Industrijski potrošači često imaju kondenzatorske baterije za kompenzaciju jalove snage, što može uzrokovati serijsku i paralelnu rezonanciju. Nekoliko je predloženih modela tereta koji su prikazani na sljedećoj slici (Slika 10) [L.14].



Slika 10. Modeliranje tereta za proračun viših harmonika

Frekvencijski ovisne impedancije svakog od modela određuju se na sljedeći način:

1. U prvom modelu reaktancija i otpor ovisni su o frekvenciji (Slika 10 a).

$$X_h = \frac{U^2}{k_h \cdot Q}, \quad \Omega \quad (30)$$

$$R_h = \frac{U^2}{k_h \cdot P}, \quad \Omega \quad (31)$$

$$k_h = 0,1 \cdot h + 0,9 \quad (32)$$

gdje su:

- h - omjer promatrane i nazivne frekvencije
- U - referentni napon, kV
- P - djelatna snaga na nazivnoj frekvenciji, MW
- Q - jalova snaga na nazivnoj frekvenciji, MVAR

$$Y_{d,h} = \frac{1}{R_h} - j \cdot \frac{1}{X_h}, \quad S \quad (33)$$

2. U drugom modelu reaktancija je frekvencijski ovisna, dok je paralelni otpor konstantan (Slika 10 a).

$$X_h = \frac{h \cdot U^2}{Q}, \quad \Omega \quad (34)$$

$$R = \frac{U^2}{P}, \quad \Omega \quad (35)$$

$$Y_{d,h} = \frac{1}{R} - j \cdot \frac{1}{X_h}, \quad S \quad (36)$$

3. Treći model, koji se još naziva i CIGRE-*in* model, dobiven je mjerenjem tereta na srednjem naponu korištenjem tonfrekvencijskog generatora signala na frekvencijama 175 i 495 Hz (Slika 10 b).

$$R = \frac{U^2}{P}, \quad \Omega \quad (37)$$

$$X_{1,h} = 0,073 \cdot h \cdot R, \quad \Omega \quad (38)$$

$$X_{2,h} = \frac{h \cdot R}{6,7 \cdot \frac{Q}{P} - 0,74}, \quad \Omega \quad (39)$$

$$Y_{d,h} = \frac{1}{R + j \cdot X_{1,h}} - j \cdot \frac{1}{X_{2,h}}, \quad S \quad (40)$$

4. Kod četvrtog modela impedancija je neovisna o frekvenciji i jednaka je impedanciji na osnovnoj frekvenciji (Slika 10 a).

$$X_h = \frac{U^2}{Q}, \quad \Omega \quad (41)$$

$$R = \frac{U^2}{P}, \quad \Omega \quad (42)$$

$$Y_{d,h} = Y_{t,h} = Y_{0,h} = \frac{1}{R} - j \cdot \frac{1}{X_h}, \quad S \quad (43)$$

5. Peti model je serijska kombinacija induktiviteta ovisnog o frekvenciji i otpora koji je neovisan o frekvenciji (Slika 10 c).

$$X_h = h \cdot \frac{U^2}{S} \cdot \sin \varphi, \quad \Omega \quad (44)$$

$$R = \frac{U^2}{S} \cdot \cos \varphi, \quad \Omega \quad (45)$$

gdje su:

S - prividna snaga opterećenja, MVA
 $\cos \varphi$ - faktor snage opterećenja

$$Z_{d,h} = R + j \cdot X_h, \quad \Omega \quad (46)$$

4.6. Kondenzatorske baterije

Kondenzatorska baterija prikazuje se susceptancijom spojenom između čvora u kojeg je spojena i referentne neutralne točke. U pojedinim izvedbama za zaštitu baterije, ispred kondenzatora se spaja prigušnica tako da nadomjesna shema izgleda kao i za uskopojasni filter (Slika 14). Izraz za impedanciju kondenzatorske baterije glasi:

$$Z_{d,h} = R + j \cdot h \cdot X - j \cdot B_h, \quad \Omega \quad (47)$$

gdje su:

h - omjer promatrane i nazivne frekvencije
 B_h - susceptancija kondenzatorske baterije u ovisnosti o frekvenciji, S
 R - djelatni otpor prigušnice, Ω
 X - reaktivni otpor prigušnice, Ω

U slučaju spoja u zvijezdu, susceptancija kondenzatorske baterije određuje se iz njezine nazivne reaktivne snage, na temelju formule:

$$B = \frac{Q}{U^2}, \quad S \quad (48)$$

U slučaju spoja u trokut susceptancija kondenzatorske baterije određuje se iz njezine nazivne reaktivne snage na temelju formule:

$$B = \frac{Q}{3 \cdot U^2}, \quad \Omega \quad (49)$$

gdje su:

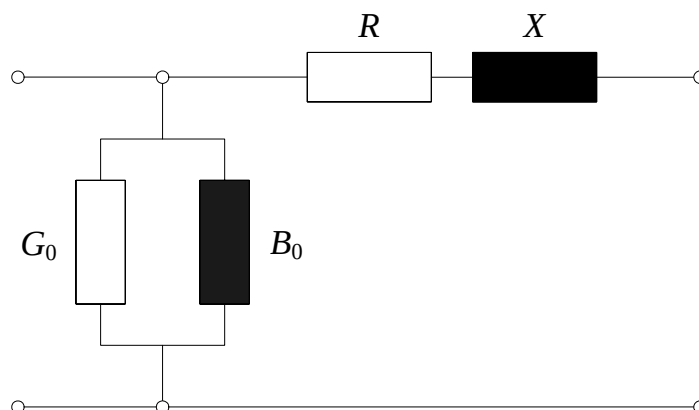
Q - nazivna reaktivna snaga kondenzatorske baterije, MVar
 U - referentni napon, kV

Ovisnost o frekvenciji određuje se na temelju formule:

$$B_h = h \cdot B, \quad S \quad (50)$$

4.7. Dvonamotni transformatori

Dvonamotni transformator se u ekvivalentnim shemama direktnog i inverznog sustava može prikazati na sljedeći način:



Slika 11. Ekvivalentna shema dvonamotnog transformatora

Uzdužnu impedanciju transformatora na nazivnoj frekvenciji $Z = R + jX$ može se izračunati iz podataka transformatora, na sljedeći način:

$$Z = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U^2}{S_n}, \quad \Omega \quad (51)$$

gdje su:

- u_k - napon pokusa kratkog spoja, %
- U - referentni napon, kV
- S_n - nazivna snaga, MVA

Djelatna komponenta uzdužne grane transformatora računa se iz podataka o gubicima kratkog spoja:

$$R = \frac{U^2}{S_n^2} P_{cu}, \quad \Omega \quad (52)$$

gdje su:

- P_{cu} - gubici u bakru, MW

Nakon što je određena apsolutna vrijednost i realna komponenta impedancije transformatora, može se odrediti i reaktancija X pomoću formule:

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2}, \quad \Omega \quad (53)$$

Apsolutna vrijednost admitancije poprečne grane računa se iz podatka o struji praznog hoda:

$$Y_0 = \frac{S_n}{U^2} \frac{i_0}{100}, \quad S \quad (54)$$

gdje je:

- i_0 - struja praznog hoda, %

Djelatna komponenta poprečne grane proizlazi iz podataka o gubicima praznog hoda:

$$G_0 = \frac{P_{Fe}}{U^2}, \quad \Omega \quad (55)$$

gdje su:

- P_{Fe} - gubici u željezu, MW

Susceptancija se može odrediti iz relacije:

$$B_0 = \sqrt{Y_0^2 - R_0^2}, \quad \Omega \quad (56)$$

Umjesto s Γ -shemom moguće je koristiti π -shemu. Razlika je jedino u tome što će poprečna grana biti podijeljena na dvije poprečne grane.

U poprečnoj grani vrijednosti impedancije daleko su veće nego u uzdužnoj grani pa se stoga mogu zanemariti, što uz praktički nesmanjenu točnost, omogućava formiranje jednostavnije ekvivalentne sheme.

Unutrašnja rezonantna frekvencija transformatora javlja se daleko iznad frekvencijskog dosega promatranja. Kapacitivnost među namotima i kapacitivnost prema zemlji imaju vrlo mali utjecaj na točnost rezultata.

Radni otpor transformatora na promatranoj frekvenciji određuje se po formuli [L.9]:

$$R_h = R \cdot (1 + k \cdot h^x), \quad \Omega \quad (57)$$

gdje su:

- k - faktor koji se kreće od 0,1 do 0,2 kod srednjonaponskih i visokonaponskih transformatora
- x - eksponent koji se kreće od 1,2 do 1,5 ovisno o snazi transformatora
- h - omjer promatrane i nazivne frekvencije napona

Uzdužna reaktancija transformatora na promatranoj frekvenciji određuje se po formuli:

$$X_h = h \cdot X, \quad \Omega \quad (58)$$

Susceptancija poprečne grane na promatranoj frekvenciji određuje se po formuli:

$$B_{0,h} = \frac{B_0}{h}, \quad \Omega \quad (59)$$

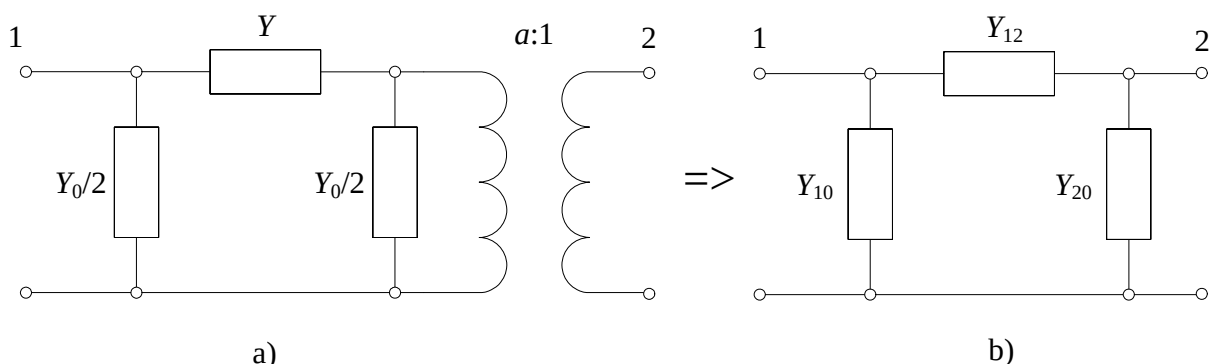
Izraz za uzdužnu impedanciju transformatora u direktnom i inverznom sustavu na promatranoj frekvenciji glasi:

$$\mathcal{Z}_{d,h} = R_h + j \cdot X_h, \quad \Omega \quad (60)$$

Izraz za admitanciju poprečne grane transformatora u direktnom i inverznom sustavu na promatranoj frekvenciji glasi:

$$\mathcal{Y}_{d,h} = G_{0,h} + j B_{0,h}, \quad \Omega \quad (61)$$

Načelo modeliranja dvonamotnog transformatora s nenazivnim prijenosnim omjerom prikazano je na sljedećoj slici (Slika 12).



Slika 12. Shema dvonamotnog transformatora za nenazivni prijenosni omjer

$$Y_{12} = \frac{Y}{a}, \quad S \quad (62)$$

$$Y_{10} = \frac{1-a}{a^2} \cdot Y + \frac{Y_0}{2 \cdot a^2}, \quad S \quad (63)$$

$$Y_{20} = \frac{a-1}{a} Y + \frac{Y_0}{2}, \quad S \quad (64)$$

$$a = \frac{U_{1s}}{U_{2s}} : \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \quad (65)$$

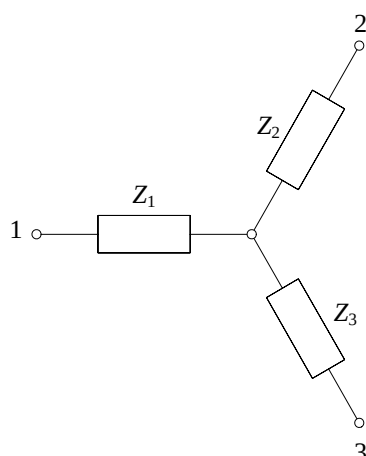
gdje su :

U_{1s}, U_{2s} - stvarni naponi primara i sekundara, kV

U_{1n}, U_{2n} - nazivni naponi primara i sekundara, kV

4.8. Tronamotni transformatori

Nadomjesna shema tronamotnog transformatora u direktnom i inverznom sustavu simetričnih komponenata određuje se prema slici:



Slika 13. Nadomjesna shema tronamotnog transformatora

Kada nazivne snage pojedinih namota tronamotnog transformatora nisu međusobno jednake, treba u računu uzeti prolaznu snagu, ako nije drugačije napomenuto uz podatke o transformatoru. Prolazna snaga je nazivna snaga slabijeg od dva promatrana namota. Tako je:

$$Z_{12} = \frac{u_{k12}}{100} \frac{U^2}{S_{n12}}, \quad \Omega \quad (66)$$

$$Z_{13} = \frac{u_{k13}}{100} \frac{U^2}{S_{n13}}, \quad \Omega \quad (67)$$

$$Z_{23} = \frac{u_{k23}}{100} \frac{U^2}{S_{n23}}, \quad \Omega \quad (68)$$

gdje su:

$u_{k12}, u_{k13}, u_{k23}$ - naponi kratkog spoja, %

$S_{n12}, S_{n13}, S_{n23}$ - prolazne snage slabijeg od dva prolazna namota, MVA

U - referentni napon, kV

Izrazi za impedancije iz nadomjesne sheme glase:

$$Z_1 = \frac{1}{2}(Z_{12} + Z_{13} - Z_{23}), \quad \Omega \quad (69)$$

$$Z_2 = \frac{1}{2}(Z_{12} + Z_{23} - Z_{13}), \quad \Omega \quad (70)$$

$$Z_3 = \frac{1}{2}(Z_{13} + Z_{23} - Z_{12}), \quad \Omega \quad (71)$$

Za ekvivalentnu shemu tronamotnog transformatora može se pri proračunu koristiti i spoj u trokutu umjesto zvijezde. Impedancije spoja u trokut tada treba transfiguracijom izračunati iz impedancija spoja u zvijezdu.

Ekvivalentne sheme autotransformatora s tercijarom jednake su onima običnih transformatora, a parametri se određuju na isti način.

4.9. Prigušnice

Prigušnice su također česti elementi mreža, a postavljaju se sa svrhom da smanje struje kratkog spoja. Uglavnom se postavljaju i ispred kondenzatorskih baterija, bilo sa svrhom formiranja filtra za određene harmonike ili pak samo za ograničavanje struja uklapanja baterija na mrežu. Ekvivalentna shema ista je kao i kod dvonamotnog transformatora uz zanemarenje poprečnih admitancija. S obzirom da otpor prigušnice iznosi do 3% veličine reaktancije prigušnice vrijedi slijedeća relacija [L.7]:

$$Z \approx X = \frac{u_n}{100\%} \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_n} = \frac{u_n}{100\%} \frac{U^2}{Q_n}, \quad \Omega \quad (72)$$

gdje su:

- u_n - pad napona pri nazivnoj struji, %
- I_n - nazivna struja, A
- Q_n - nazivna jalova snaga, MVar
- U - referentni napon, kV

Reaktancija se mijenja s frekvencijom prema formuli:

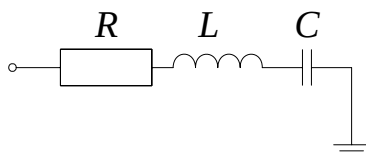
$$X_h = h \cdot X, \quad \Omega \quad (73)$$

gdje je:

- h - omjer promatrane i nazivne frekvencije

4.10. Uskopojasni filter

Uskopojasni filter nadomješta se serijskim RLC spojem, koji je spojen između čvora gdje je priključen i neutralne referentne točke (Slika 14).



Slika 14. Uskopojasni filter.

Izraz za impedanciju uskopojasnog filtra glasi:

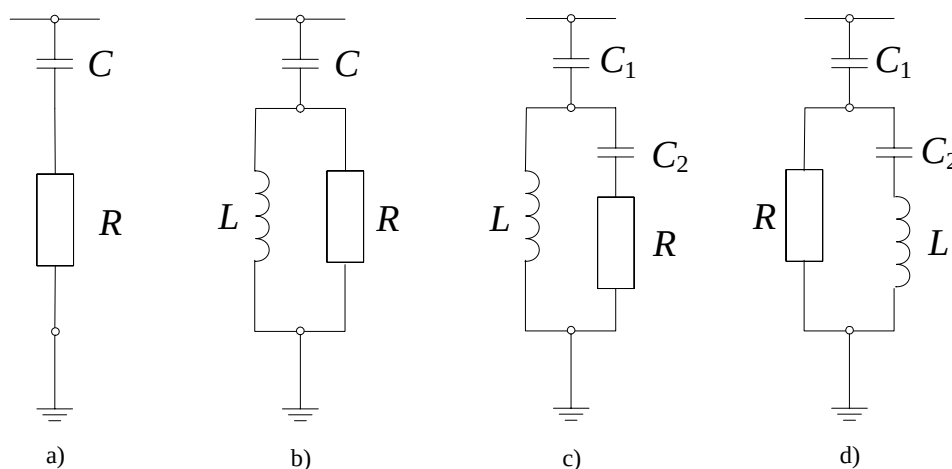
$$Z_h = R + j \cdot \left(h \cdot \omega \cdot L - \frac{1}{h \cdot \omega \cdot C} \right), \quad \Omega \quad (74)$$

gdje su:

- R - djelatni otpor prigušnice, Ω
- L - induktivitet prigušnice, H
- C - kapacitet kondenzatora, F
- ω - kružna frekvencija, rad/s
- h - omjer promatrane i nazivne frekvencije

4.11. Širokopojasni filtri

Na sljedećoj slici (Slika 15) prikazana su četiri tipa širokopojasnih filtara.



Slika 15. Širokopojasni filtri: (a) prvog reda; (b) drugog reda; (c) trećeg reda, (d) C-tip.

Admitancija filtra drugog reda glasi:

$$Y_{d,h} = \frac{1}{j \cdot h \cdot \omega \cdot C} + \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{j \cdot h \cdot \omega \cdot L}}, \quad S \quad (75)$$

Admitancija filtra trećeg reda s dva jednaka kondenzatora kapaciteta C glasi:

$$Y_{d,h} = \frac{1}{j \cdot h \cdot \omega \cdot C} + \frac{1}{\frac{1}{R + \frac{1}{j \cdot h \cdot \omega \cdot C}} + \frac{1}{j \cdot h \cdot \omega \cdot L}}, \quad S \quad (76)$$

gdje su:

- R - djelatni otpor prigušnice, Ω
- L - induktivitet prigušnice, H
- C - kapacitet kondenzatora, F
- ω - kružna frekvencija, rad/s
- h - omjer promatrane i nazivne frekvencije

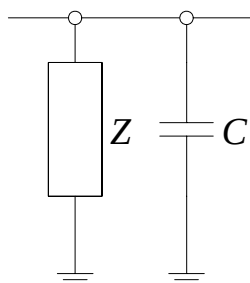
4.12. Modeliranje razdjelne mreže

Pri proračunu širenja MTU signala u mreži 110 kV, 35(30) kV, ili 10(20) kV, često je potrebno modelom nadomjestiti razdjelnu mrežu niže naponske razine, koja je priključena na promatranu mrežu. To se radi iz praktičnih razloga, jer je često nemoguće pribaviti podatke o svim komponentama razdjelne

mreže niže naponske razine. Tako se zapravo razdjelna mreža nadomješta modelom, koji sadrži prevladavajuće značajke promatrane mreže. U nadomjesnom modelu razdjelne mreže potrebno je uvažiti sljedeće pretpostavke:

- Nadzemni vodovi i kabeli modeliraju se ekvivalentnom π -shemom (poglavlje 4.1). Kratki se vodovi mogu nadomjestiti ukupnim kapacitetom voda, spojenim na krajnje sabirnice.
- Transformatori između promatrane mreže i mreže niže naponske razine nadomještaju se modelom transformatora (poglavlje 4.7).
- Kondenzatorske baterije za kompenzaciju jalove snage trebaju se modelirati čim točnije (poglavlje 4.6).
- Komponente, kako što su zavojnice, filtri i generatori trebaju se modelirati čim točnije.
- Modeliranje mreže mora biti čim detaljnije u blizini onih dijelova mreže, koji su od interesa. Pojednostavljeni ekvivalenti mreže mogu se koristiti samo za udaljene dijelove mreže.

U srednjonaponskoj mreži postoje kabelski vodovi i kompenzacija jalove snage, koje je potrebno uzeti u obzir pri proračunu harmonika. Kapaciteti će se u modelu prikazati kao jedan kapacitet paralelno spojen s modelom opterećenja (Slika 16). Spomenuti kapacitet može se u ovisnosti o tipu mreže određivati iz jalove reaktivne snage, koja je se određuje iz udjela u ukupnom radnom opterećenju.



Slika 16. Model opterećenja s kapacitetom

4.13. Nadomjesna shema aktivne mreže

U ekvivalentnim shemama aktivna mreža prikazuje se odgovarajućom impedancijom:

$$Z_{d,h} = R + j \cdot h \cdot X, \quad \Omega \quad (77)$$

gdje su:

- R - radni otpor mreže, Ω
- X - reaktancija mreže, Ω
- h - omjer promatrane i nazivne frekvencije

Reaktancija mreže u direktnom, inverznom i nultom sustavu računa se iz podataka o početnoj trolnoj i jednopolnoj struji kratkog spoja mreže u točki ekvivalentiranja [L.15]:

$$Z_d = Z_i = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_{KS3}}, \quad \Omega \quad (78)$$

$$Z_0 = \sqrt{3} \frac{U}{I_{KS1}} - \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U}{I_{KS3}}, \quad \Omega \quad (79)$$

gdje su:

- I_{KS3} - struja trolnog kratkog spoja u točki ekvivalentiranja, MVA
- I_{KS1} - struja jednopolnog kratkog spoja u točki ekvivalentiranja, MVA
- U - referentni napon, kV

Kod naponskih razina viših od 35 kV djelatni otpor se može zanemariti. U ostalim slučajevima djelatni otpor može se odrediti iz omjera R/X aktivne mreže koji je obično 0,1 [L.15]:

$$X = \frac{Z}{\sqrt{\left(\frac{R}{X}\right)^2 + 1}}, \quad \Omega \quad (80)$$

$$R = \sqrt{Z^2 - X^2}, \quad \Omega \quad (81)$$

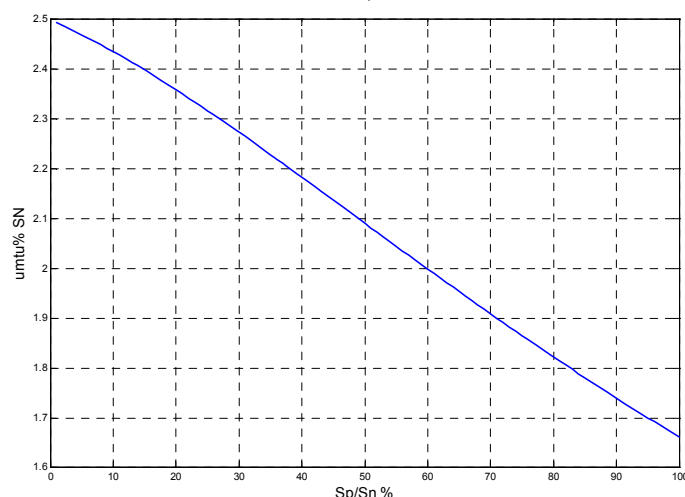
5. ANALIZA OSJETLJIVOSTI PRORAČUNA MTU SIGNALA

Za određivanje najnepovoljnijih uvjeta za širenje MTU signala u elektroenergetskoj mreži napravljena je analiza osjetljivosti, pri čemu su mijenjani pojedini parametri proračuna uz zadržavanje ostalih parametara na početnim vrijednostima. Napravljeni su proračuni uz analizu utjecaja promjene sljedećih parametara:

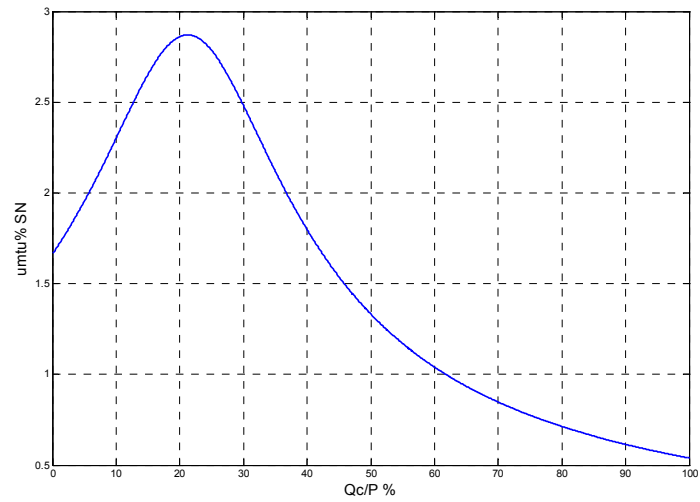
- snage potrošača (Slika 17),
- kapaciteta SN mreže (Slika 18),
- napona pokusa kratkog spoja VN/SN transformatora (Slika 19),
- faktora snage (Slika 20),
- frekvencije MTU signala (Slika 21),
- snage kratkog spoja VN mreže (Slika 22).

Početne vrijednosti parametara proračuna su sljedeće:

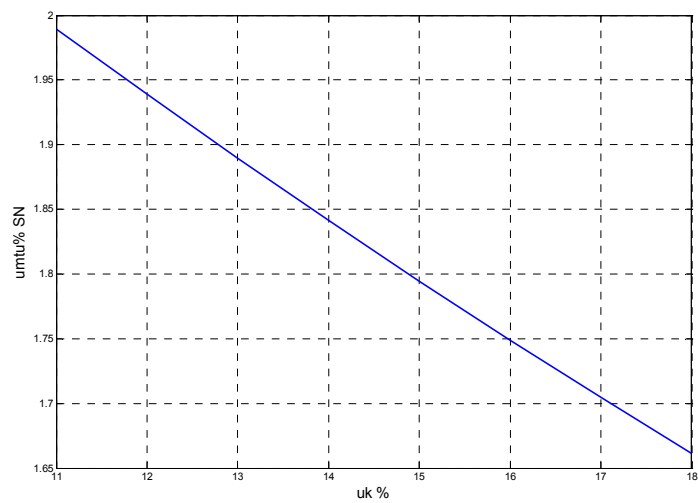
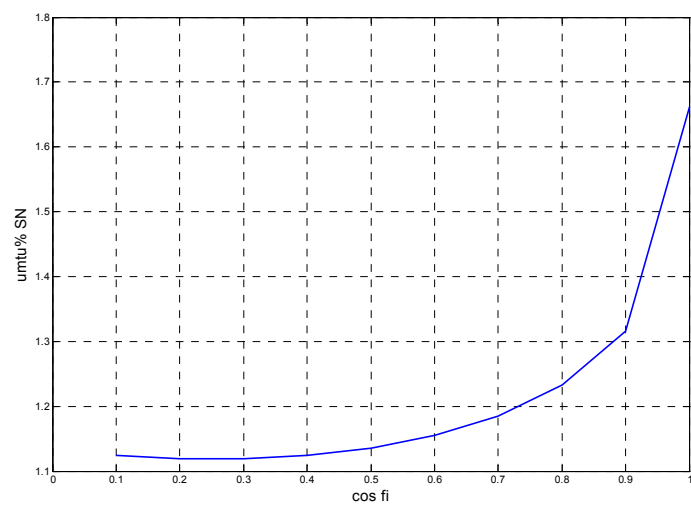
- napon kratkog spoja VN/SN transformatora: $u_k = 18\%$
- nazivna snaga VN/SN transformatora: $S_n = 40\text{MVA}$
- faktor snage potrošača: $\cos \varphi = 1$
- napon MTU signala: $u_{MTU} = 2.5\%$
- frekvencija MTU signala: $f_{MTU} = 283.3$
- najveća struja MTU odašiljača: $I_{MTU\max} = 150\text{A}$
- struja trolnog kratkog spoja VN mreže: $I_{3pks} = 25\text{ kA}$



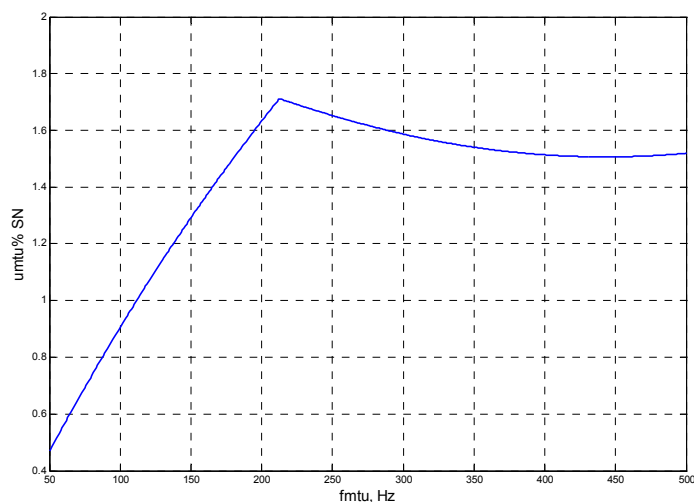
Slika 17. Analiza utjecaja snage potrošača



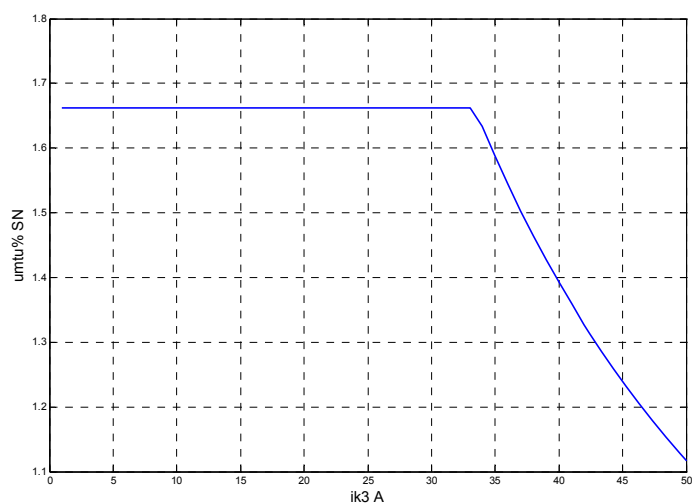
Slika 18. Analiza utjecaja kapaciteta donje mreže

Slika 19. Analiza utjecaja u_k transformatora

Slika 20. Analiza utjecaja faktora snage



Slika 21. Analiza utjecaja frekvencije MTU signala



Slika 22. Analiza utjecaja VN mreže

Na temelju iznesenog može se zaključiti sljedeće:

- Porast opterećenja za posljedicu ima snižavanje razine MTU signala (Slika 17) .
- Povećanje kapaciteta donje mreže za posljedicu ima povišenje razine MTU signala. Ovdje treba napomenuti da je realni udio kapaciteta donje mreže u Q_c/P od 5% do 30 % (Slika 18).
- Povećanje u_k transformatora za posljedicu ima sniženje razine MTU signala (Slika 19).
- S povećanjem faktora snage povećava se i razina MTU signala (Slika 20).
- Kod variranja frekvencije MTU signala vidljivo je da do frekvencije 215 Hz MTU, uz ograničenje struje MTU signala na 150 A, odašiljač ne može doseći potrebnu razinu signala. Nakon porasta frekvencije iznad 215 Hz razina MTU signala opada s porastom frekvencije (Slika 21).
- Slično se događa i kod variranja struje kratkog spoja VN mreže. Nakon 33 kA odašiljač ne može nadoknaditi odlazak struje u VN mrežu i signal linearno opada (Slika 22).

6. USPOREDBA REZULTATA PRORAČUNA I MJERENJA

Budući da se zaključci referata umnogome temelje na rezultatima proračuna širenja MTU signala, potrebno je usporediti rezultate proračuna i izmjerene veličine razine MTU signala u mrežama gdje postoji utiskivanje MTU na 110 kV.

U HEP-u su do sada izgrađena dva postrojenja MTU na 110 kV. Prvo postrojenje, koje je pušteno u pogon je u DP "Elektrodalmacija" Split u TS 110/35 kV Vrboran. Krajem 2004. također je i u DP "Elektra" Zagreb pušteno u pogon MTU postrojenje u TS 110/20 kV Botinec.

Za područje DP "Elektrodalmacija" Split napravljena su mjerenja za potrebe studije [L.2]. Za potrebe ove studije na području DP "Elektra" Zagreb, također je proveden niz mjerenja koja će u nastavku studije biti prikazana.

6.1. DP "Elektrodalmacija" Split

Za područje DP "Elektrodalmacija" Split napravljeni su proračuni za sadašnje stanje mreže i opterećenja (2005. godina). Karakteristike proračuna su; $f_{MTU}=208,33$ Hz, $u_{MTU}=2,9\%$, $I_{MTU}=104,5$ A, $S_{MTU}=577,5$ kVA, $Z_{mreže}=17,6\Omega$.

U sljedećoj tablici navedeni su usporedno rezultati proračuna i rezultati mjerenja razine MTU signala u čvorovima mreže (Tablica I).

Tablica I. Usporedba rezultata proračuna i izmjerenih veličina MTU signala u mreži DP "Elektrodalmacija" Split [L.2]

Naziv čvora	$u_{MTU}\%$ Izračunato	$u_{MTU}\%$ Izmjereno
VRBORAN, 110 kV	2.90	2,90
SUČIDAR, 110 kV	2.90	2,80
METERIZE, 110 kV	2.80	2,90
KONJSKO, 110 kV	2.30	2,30
STARI GRAD, 110 kV	2.30	2,70
NEREŽIŠĆA, 110 kV	2.30	2,57
D.RAT, 110 kV	2.30	2,70
ZAKUČAC, 110 kV	2.20	2,70
MAKARSKA, 110 kV	1.90	1,94
METRIZE, 35 kV	2.60	2,57
ZAKUČAC, 35 kV	2.10	2,70
STARI GRAD, 35 kV	2.10	3,89
NEREŽIŠĆE, 35 kV	1.90	2,45
MAKARSKA, 35 kV	1.70	1,76
OPUZEN, 35 kV	1.30	1,59
SUČIDAR, 10 kV	2.10	2,31
MAKARSKA, 10 kV	1.70	1,60

Iz prikazane tablice vide se dobra slaganja izmjerenih i izračunatih rezultata.

6.2. Utjecaj kompenzacije u TS 110/10 kV Sopot

U TS 110/10 kV Sopot istražio se utjecaj kompenzacije na 10 kV. U tu su svrhu napravljena mjerenja i izvršeni usporedni proračuni koji su prikazani u sljedećoj tablici (Tablica II). Značajke kompenzacije su: $U_n = 10$ kV, $Q_c=2,4$ MVar, $L=5,9$ mH. Na temelju podataka može se izračunati da je kapacitet kondenzatorske baterije:

$$C = \frac{Q}{U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n} = \frac{2,4}{10^2 \cdot 314} = 76,4 \quad \mu F$$

Rezonantna frekvencije filtarskog sklopa je:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{5,9 \cdot 10^{-3} \cdot 76,4 \cdot 10^{-6}}} = 210\text{Hz}$$

Iz navedenog se može zaključiti da će filter priključen na 10 kV sabirnice u TS 110/10 kV Sopot umanjiti signal na 10 kV sabirnicama, zbog toga što se rezonantna frekvencija nalazi dovoljno blizu frekvencije MTU signala (283,3 Hz). Spomenutu pretpostavku potvrdila su i mjerenja.

Tablica II. Utjecaj kompenzacije u TS 110/10 kV Sopot

Kompenzacija	U _{MTU} % Izračunato	U _{MTU} % Izmjereno
uključena	1,63	1,78
isključena	2,21	2,18

Iz prikazane tablice vide se dobra slaganja izmjerenih i izračunatih rezultata.

7. PRIJEDLOG IMPLEMENTACIJE MTU-a U MREŽI 110 kV

Proračun širenja MTU signala napravljen je za buduću mrežu HEP OPS-a, pri čemu su uvaženi planovi izgradnje elektroenergetskih objekata na visokom naponu do 2015 g. Da bi proračun bio na strani sigurnosti, odnosno najnepovoljnijih uvjeta u pogledu širenja signala, pretpostavljena su neistodobna vršna opterećenja TS 110/x kV, na temelju godišnjih izvještaja HEP OPS. Osim kompenzacije priključene na SN sabirnicama u TS 110/x kV, uzeti su u obzir i kapaciteti priključenih kabela i kondenzatorskih baterija na srednjem i niskom naponu. Navedeni kapaciteti će se u modelu prikazati kao kapacitet paralelno spojen s modelom opterećenja (Slika 16). Reaktivna snaga uslijed kapaciteta kabela i kompenzacije, za potrebe proračuna, pretpostavlja se da je 5% maksimalnog radnog opterećenja TS 110/x kV.

Proračuni širenja MTU signala u mreži 110 kV HEP-a napravljeni su dakle na temelju slijedećih pretpostavki:

- Obrađena je planska mreža 110 kV, koja se očekuje oko 2010 – 2015 g. U tom smislu procijenjena je preraspodjela opterećenja između postojećih i novih TS 110/x kV
- Proračuni su izvršeni za pretpostavljena vršna opterećenja TS 110/x kV
- Lokacije za injektiranje MTU signala (nova postrojenja) odabrane su temeljem dosadašnjih istraživanja iz tog područja ili temeljem procijene optimalnog položaja u mreži 110 kV.

Kriteriji za provjeru zadovoljavajuće razine signala na pragu distribucijske SN mreže određeni su temeljem proračuna tipičnih mreža 110/35/10(20)/NN, odnosno 110/10(20)/NN. Definirani su slijedeći kriteriji:

- Transformacija 110/10(20) kV: zadovoljavajuća razina signala na sabirnicama 10(20) kV je **1.0 %**
- Transformacija 110/35 kV: zadovoljavajuća razina signala na sabirnicama 35 kV je **1.5 %**.
Ukoliko je razina signala između 1.0 i 1.5 %, **vjerojatno** je situacija opet zadovoljavajuća ali bi trebalo provjeriti lokalne prilike u mreži 35 kV (ovisne o vrsti mreže, opterećenju).

Dakako, pretpostavlja se da svi MTU prijemnici prorađuju ukoliko je **napon signala veći od 0.52%**.

Radi provedbe ekonomske usporedbe pretpostavlja se da je cijena MTU postrojenja na 110 kV 4,44 puta veća od MTU postrojenja na srednjem naponu. Drugim riječima, ukoliko jedno MTU postrojenje na 110 kV strani zamijeni pet MTU postrojenja na SN strani može se smatrati da je uvođenje MTU-a na 110 kV ekonomski opravdano.

Što se tiče troškova polja 110 kV, odnosno SN utvrđene su slijedeće jedinične cijene:

- Opremanje dodatnog polja 110 kV: 1.100.000 kuna
- Cijena polja SN: 240.000 kuna

Pri ugradnji MTU postrojenja na naponskoj razini 110 kV u pravilu je potrebno opremiti dodatno polje 110 kV. U slučaju MTU postrojenja na srednjem naponu situacija je bitno drugačija, budući da postoje rezervna ili već postojeća polja za priključak MTU. Trebalo bi stoga valorizirati i činjenicu da se uvođenjem MTU-a na 110 kV, na srednjem naponu oslobađaju polja, koja se mogu koristiti i za druge namjene (posebice za priključak novih vodova SN).

U navedenom graničnom slučaju kada MTU na 110 kV zamijeni 5 MTU postrojenja na SN, "oslobađa" se 10 polja srednjeg napona, čime se nadmašuju troškovi opremanja polja 110 kV.

Proračunima je utvrđena potreba za ukupno 9 MTU postrojenja u slučaju utiskivanja signala na 110 kV (Tablica III). Pritom je uvažena činjenica da su u TS 110/35 kV Vrboran i TS 110/20 kV Botinec već ugrađena MTU postrojenja te da je TS 110/35 kV Krasica ranijom studijom već određena kao lokacija za potrebe DP Elektroprimorje Rijeka.

Tablica III. Broj postrojenja po područjima

Područje	Broj postrojenja	Frekvencija Hz
Zagreb	2	283,3
Split	1	208,3
Rijeka	1	216,6
Osijek	1	186,0
Sjeverozapadna Hrvatska	1	192,0
Pula	1	283,3
Sisačko-moslavačka županija	1	192,0
Zadar	1	216,6

Tamo gdje je primjena MTU-a raširena pretpostavljena je sadašnja frekvencija, zbog velikog broja prijamnika. U ostalim područjima zbog globalne analize pretpostavljene su naveden frekvencije, ali moguće su i korekcije, u ovisnosti o detaljnijim lokalnim analizama.

Uz korištenje 9 MTU postrojenja na 110 kV pokrila bi se konzumna područja 126 TS 110/x kV. U prosjeku jedno MTU postrojenje na 110 kV zamjenjuje približno 16 MTU postrojenja na srednjem naponu, što pokazuje veliku rentabilnost tog projekta.

8. ZAKLJUČCI

Temeljem provedenih proračuna širenja MTU signala u mreži 110 kV utvrđeno je da se pomoću devet odašiljačkih postrojenja može pokriti najveći dio RH. – čak 126 TS 110/x kV. Nepokriven ostaje samo manji broj TS 110/x kV, odnosno njih 18. Vjerojatno je i taj broj moguće smanjiti suradnjom susjednih DP-ova.

Gledano sa stanovišta investicijskih ulaganja radi se o vrlo rentabilnom projektu. Jedno MTU postrojenje na 110 kV košta kao pet postrojenja na srednjem naponu. Proračunom je procijenjeno da jedno postrojenje na 110 kV može u prosjeku zamijeniti 16 postrojenja na srednjem naponu.

Osim toga ne smije se zanemariti i ušteda u troškovima održavanja. Sigurno je da su ti troškovi za jedno MTU postrojenje na 110 kV znatno niži nego za 16 postrojenja na srednjem naponu. Ta se činjenica potencira naročito ako se radi o postojećim, dotrajanim SN postrojenjima.

Dinamika uvođenja MTU postrojenja na 110 kV uvjetovana je stanjem na terenu. U prvom redu treba ugraditi MTU postrojenja na 110 kV u područjima koja danas nemaju taj sustav. Osim toga nužno je ugraditi MTU postrojenja u područja s velikim brojem dotrajalih SN postrojenja.

Što se tiče MTU prijemnika nužna je ugradnja kvalitetnih jedinica koje će jamčiti prorađu za propisanu razinu signala – **0.5 %**. Prijemnici moraju osigurati redundanciju takozvanom lokalnom inteligencijom za slučaj eventualnog zastoja u radu MTU odašiljača. Smatramo da je to racionalnije rješenje od ugradnje dvostrukih MTU postrojenja na 110 kV.

Odabir frekvencije MTU-a na područjima gdje takav sustav već koristi, određen je zatečenim stanjem.

LITERATURA

- [1] L. Wagmann, E. Mihalek, Izvodljivost primjene sustava mrežnog tonfrekventnog upravljanja sa utiskivanjem signala u mrežu 110 kV na području DP Elektroprimorje Rijeka, EIHP, Zagreb, 2004.
- [2] R. Goić, S. Milun, Razvoj i primjena sustava mrežnog tonfrekventnog upravljanja u DP Elektrodalmacija Split, FESB, Split, 2004.

- [3] Proračun impedancijsko-frekvencijskih karakteristika i širenja MTDU signala u široj mreži grada Splita, ELMAP, Split, 1996.
- [4] K. Šimleša, Analiza postojećeg stanja i pravci MTU u DP Elektroprimorje Rijeka, Rijeka veljača 1995.
- [5] T. J. Densem, P. S. Bodger, J. Arrillaga, Three Phase Transmission System Modelling For Harmonic Penetration Studies, IEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, NO.2, February 1984.
- [6] A. A. Mahmoud, R. D. Shultz, A Method For Analyzing Harmonic Distribution In A.C. Power Systems, IEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, NO.6, June 1982.
- [7] Short-Circuit Currents In Three-Phase Systems, Siemens, 1985.
- [8] M. Ožegović, K. Ožegović, ELEKTRIČNE MREŽE I, Split 1982
- [9] S. Milun, Kompenzacija jalove snage i utjecaj viših harmonika u elektrodistributivnoj mreži grada Zagreba, KNJIGA 2, Institut za elektroprivredu-Zagreb, Zagreb, veljača 1988.
- [10] D. Nevečerel, M. Mehmedović, Z. Tonković, L. Wagmann, E. Vargović, Nesimetrično opterećenje i viši harmonici u EES - I faza, Institut za elektroprivredu-Zagreb, Zagreb, veljača 1992.
- [11] E. W. Kimbark: Direct Current Transmission, John Wiley & Sons, Interscience, 1971.
- [12] B. Filipović, S. Žutobradić, L. Wagmann: Rješenje za suzbijanje širenja viših harmonika uzrokovanih postrojenjem ispravljačke stanice na Bliznečkoj cesti, Institut za elektroprivredu, Zagreb 1988.
- [13] A. K. Šidlovskii, B. G. Kuznjecov: Pavišenje kačestva energij v električeskijh sjetjah, Naukova dumka, Kijev, 1985.
- [14] Working Group 36-05 (Disturbing loads) (1), Harmonics, characteristic parameters, methods of study, estimates of existing values in the network, "ELECTRA", Pariz, br.77, srpanj 1981, atr. 35-54
- [15] Short-circuit Current Calculation in Three-phase A.C.Systems, IEC(909), 1988
- [16] Stagg and El-Abia, Computer Methods in Power System Analysis, McGraw-Hill, 1968
- [17] A. L. Day, A. A. Mahmou, Methods of Evaluation of Harmonic Levels in Industrial Plant Distribution Systems, IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. IA-23, NO. 3, May/June 1987.
- [18] K. L. LO., K. M. GOH, Harmonic Analysis for Power Networks, Electric Power Systems Research, 10 (1986).
- [19] N. R. Watson, J. Arrillaga: Frequency-Dependent A.C. System Equivalents for Harmonic Studies And Transient Converter Simulation, IEE Transactions on Power Delivery, Volume 3, No. 3, July 1988.