



PANNON EGYETEM, MŰSZAKI INFORMATIKAI  
KAR

# Nem mért vételezés detektálása evolúciós algoritmussal

*Greber Márton(DRVUFV)*

2018.03.19.

# 1. Bevezetés

Villamos hálózat esetében akkor beszélhetünk nem mért vételezésről, ha a hálózati teljesítménymérleg nem teljesül. Ez annyit jelent hogy a betáplált és az elfogyasztott teljesítmény nem egyezik meg,  $n$  ággal rendelkező hálózatra tehát:

$$\sum_{i=1}^n P_i \neq 0 .$$

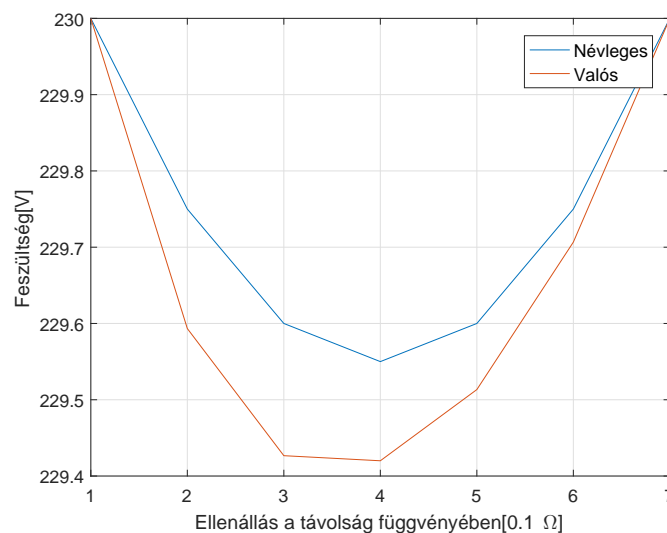
Ezt a kifejezést kicsit tovább boncolgatva megállapítható, hogyha a betáplálási pontok által reprezentált teljesítmény nagyobb, mint a regisztrált fogyasztók szükséglete, akkor további vizsgálatot érdemel a hálózat. Tehát számszerűsíthető a teljesítmény deficit:

$$P_{Theft} = P_{Feeder} - P_{Customer}$$

Ebben az esetben azonban egy fontos dolgot nem vettem figyelembe, amely a hálózaton fellépő technológiai veszteség. Ennek meghatározása, illetve előrejelzése más feladat, beszámolómban erre nem térek ki. Azonban, hogy a mérnöki elvárásoknak megfelelő számításokat és eredményeket érjek el a következő modellezési megkötésekkel tettem. A hálózat szimulációja során a betáplálási pontok mint feszültségforrások, a fogyasztók mint áramforrások, a vezetékek mint tisztán ohmikus rezisztív elemek kerülnek felhasználásra. A lakossági vételezési pontok esetén a teljesítmény tényező értékét 1-nek feltételeztem. Ezen feltételekkel az illegálisan elfogyasztott energiát, mint áramerősség írom le, tehát:

$$I_{Theft} = I_{Feeder} - I_{Customer}$$

Áramlopás esetén egy ismertető jel, hogy a hálózaton jelentkező feszültségesés nagyobb lesz, mint névleges esetben(lásd 1.ábra). Ezen esetben érdemes megvizsgálni a legnagyobb



1. ábra. Két pontont táplált hálózat nem mért vételezéssel

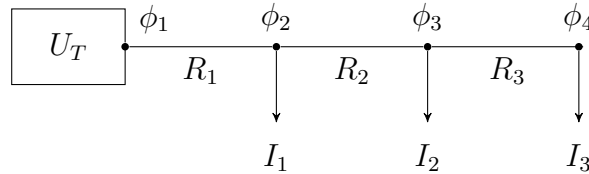
feszültség eltéréssel rendelkező pontokat, azonban ez csak egy szükséges, de nem elégséges feltétele a tevékenység detekciójának.

## 2. Villamosságtani áttekintés

A modellezési feltételeknek megfelelő villamos hálózat számítására a csomóponti potenciálok módszerét használtam fel. Melynek formális definíciója:

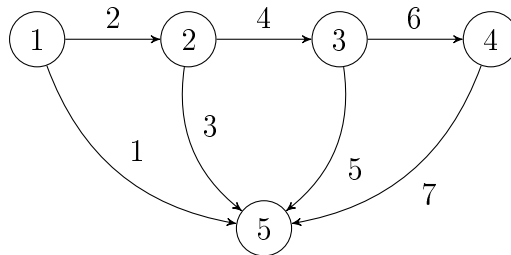
$$\underline{\phi} = (\underline{A} \underline{Y} \underline{A}^T)^{-1} \underline{A} (\underline{Y} \underline{U}_v - \underline{I}_a)$$

Szemléltető példaként álljon a következő egy ponton táplált hálózat, melynek csomóponti feszültségeit szeretnénk meghatározni, a fogyasztás ismeretében.



2. ábra. Példahálózat

Ezen módszer használatához szükséges felírni a villamos hálózat egy irányított gráfját (lásd 3. ábra). Látható, hogy a hálózat sematikus ábráján nem látható a gráf 5-ös csomópontja, ez a földpotenciál (0V).



3. ábra. Példahálózat gráfja

Az  $\underline{A}$  mátrixot incidencia mátrixnak hívják, mely a hálózat topológiájának leírására szolgál.  $n$  csomóponttal és  $m$  darab éllel rendelkező hálózat során a fundamentális  $\underline{A}_f$  mérete:  $n \times m$ . Számításaim során azonban a redukált incidencia mátrixot használom, melynek mérete:  $n - 1 \times m$ . A mátrix  $(i, j)$ -edik eleme megadja, hogy az  $i$ -edik csomópontba kapcsolódik-e a  $j$ -edik él. Ha igen akkor pedig a referencia megállapodástól függően tájékoztat arról, hogy az él elhagyja-e az adott csomópontot vagy éppen oda érkezik. Az önkényesen felvett referenciák: csomópontba mutató él  $(-)$ , elmutató él  $(+)$  előjelet kap. A példahálózatra vonatkozó incidencia mátrix a következő:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Jól látható, hogy a második sorban csak a 2, 3, 4 oszlopban van nem nulla érték, hiszen a második csomópontba a 2, 3, 4-es ágak kapcsolódnak.

Az  $\underline{Y}$  diagonális mátrix, az egyes ágak vezetéseinek értékeit tartalmazza, tehát a dimenziója  $[\underline{S}]$ .  $(i, i)$ -edik eleme megadja az  $i$ -edik ágban található vezetés értékét. A példahálózat admittancia mátrixa:

$$\underline{Y} = \text{diag} \left[ 0 \quad \frac{1}{R_1} \quad 0 \quad \frac{1}{R_2} \quad 0 \quad \frac{1}{R_3} \quad 0 \right].$$

Az  $\underline{U}_v$  és  $\underline{I}_a$  oszlopvektorok pedig az egyes ágakban található feszültség- illetve áramforrások értékeit tartalmazzák.  $(i, 1)$ -edik elemük megadja az  $i$ -edik ágban található áram- illetve feszültségforrás értékét.

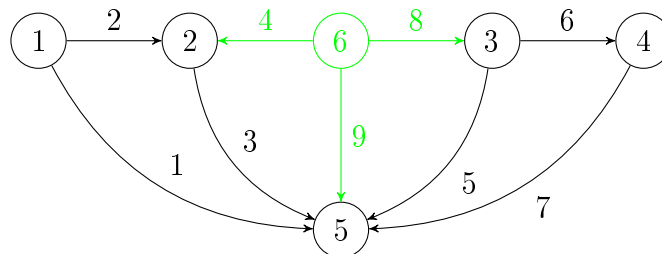
$$\underline{U}_v^T = [U_T \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0],$$

$$\underline{I}_a^T = [0 \quad 0 \quad I_1 \quad 0 \quad I_2 \quad 0 \quad I_3].$$

Mivel minden villamos kétpólust külön ághoz rendeltem, ezért az invertálandó mátrix szingulárisává válik. Ennek a kiküszöbölésére a feszültségforrást tartalmazó ágakhoz az  $\underline{Y}$  mátrixban a nekik megfelelő élekhez, egy a hálózatot alkotó ellenállásoknál nagyságrenddel kisebb értékű ellenállás érték kerül beillesztésre.

### 3. A hálózatleíró mátrixok kibővítése

A detekciós eljárás fő mozzanata, hogy meglévő hálózati struktúrába helyezek el új fogyasztókat. Ezen áramforrások segítségével reprodukálom a valós hálózatot üzemállapotát. Azonban ehhez módosítani kell a hálózat leírására szolgáló mátrixokat. Szemléltető példaként az előbb ismertetett példahálózat 2 és 3 csomópontja közé illeszttek egy új csomópontot fogyasztóval. A hálózat csomópontjainak száma eggyel növekszik, az ágak száma pedig kettővel.



4. ábra. Egy darab beillesztett csomópont

Ezen folyamathoz szükséges információ az él és a hozzá csatlakozó csomópontok gráfbeli indexe. Legyen  $V$  a felbontandó él  $N_1$  és  $N_2$  pedig a csomópontok. Ezt egy struktúrába foglalva (NodesConnectedToVertice):  $\underline{NCTV} = [N_1 \quad N_2 \quad V]$ , számszerűsítve jelen esetben  $\underline{NCTV} = [2 \quad 3 \quad 4]$ . A beillesztendő elemek paramétereit a következő mátrix tartalmazza (DummyNodeProperties):  $\underline{DNP} = [R_1 \quad R_2 \quad I_{theft}]$ . Mivel  $R = \rho \frac{l}{A}$ , ahol  $\rho$  a fajlagos ellenállás,  $l$  a hossz,  $A$  a vezeték keresztmetszete, tehát az ellenállás arányos a távolsággal. Ezért  $R_1$  és  $R_2$  paraméterek segítségével a beillesztett fogyasztó távolságát tudom beállítani a szomszédos csomópontoktól.

A kibővítés során először létrehozok egy olyan sorvektort (NewNode)  $\underline{NN}$ , melynek hossza  $n + 2$ , értékei:

$$\underline{NN}_i = \begin{cases} 1, & i = \{V, n + 1, n + 2\} \\ 0, & \text{egyébként} \end{cases}.$$

Ezután az  $\underline{\underline{A}}$  mátrix  $V$ -edik oszlopát ki kell nullázni, majd felírjuk az új alakját(lásd 5. ábra):

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} \underline{\underline{A}}_{prev} & \underline{\underline{null}}(m, 2) \\ & \underline{\underline{NN}} \end{bmatrix}.$$

Ezután már csak el kell végezni az összekötést az új élek és  $N_1, N_2$  csomópontok között.

$$\underline{\underline{A}}_{N_1, V} = -1,$$

$$\underline{\underline{A}}_{N_2, n+1} = -1.$$

Az incidencia mártix készen van, a többi hálózatleíró mátrix bővítése, az új élek és a számozásnak megfelelően a következő:

$$\underline{\underline{U}}_v^T = [\underline{\underline{U}}_v^T \quad 0 \quad 0]$$

$$\underline{\underline{I}}_a^T = [\underline{\underline{I}}_a^T \quad 0 \quad I_{theft}]$$

$$\underline{\underline{Y}} = \text{diag} [\underline{\underline{Y}} \quad \frac{1}{R_2} \quad 0]$$

Ahol természetesen az  $\underline{\underline{Y}}_V$ -et az új értékre kell frissíteni,  $\underline{\underline{Y}}_V = \frac{1}{R_1}$ .

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$\uparrow$   $\nearrow$   $\searrow$   
 $v(R_1)$   $v(R_2)$   $v(I_{theft})$

5. ábra. A kibővített  $\underline{\underline{A}}$  mátrix

---

### Algoritmus 1 Csomópont beillesztés

---

**INPUT:**  $A, R, I_a, U_v, m, n, DNP, NCTV$

**OUTPUT:**  $A, R, I_a, U_v$

- 1:  $NN \leftarrow \text{zeros}(1, n + 2)$
  - 2:  $NN(NCTV(1, 3)) \leftarrow 1$
  - 3:  $NN(n + 1) \leftarrow 1$
  - 4: **for**  $i = 1$  to  $m$  **do**
  - 5:      $A(i, NCTV(1, 3)) \leftarrow 0$
  - 6: **end for**
  - 7:  $nullM \leftarrow \text{zeros}(m, 2)$
  - 8:  $A \leftarrow [A, nullM; NN]$
-

---

```

9:  $c = 1$ 
10: for  $i = 1$  to  $n + 2$  do
11:   if  $A(m + 1, i) \neq 0$  then
12:      $A(NCTV(1, c), i) \leftarrow -1$ 
13:      $c \leftarrow c + 1$ 
14:   end if
15: end for
16:  $A(m + 1, n + 2) \leftarrow 1$ 
17:  $U_v \leftarrow [U_v; 0; 0]$ 
18:  $I_a \leftarrow [I_a; 0; DNP(1, 1)]$ 
19:  $R(NCTV(1, 3)) \leftarrow DNP(1, 1)$ 
20:  $R \leftarrow [R, DNP(1, 2), 0]$ 

```

---

### 3.1. Teljes kibővítés

Mivel a lehetséges nem mért vételezés helyét nem csak két csomópont között, hanem az egész hálózaton át szeretném vizsgálni, ezért szükséges a hálózat egészét kibővíteni. Tehát minden egyes vezetékdarabot felosztok két részre, és egy fogyasztót illeszték ezen csomópontokhoz. Ezért szükséges kigyűjteni a hálózat összes ellenállást tartalmazó ágát, és az áganként hozzájuk csatlakozó csomópontokat. Az  $NCTV$  ezáltal egy mátrix lesz, melynek  $i$ -edik sora tartalmazza  $\underline{V}_i$ -edik élhez tartozó csomópontokat.

$$\underline{NCTV} = [\underline{N}_1 \quad \underline{N}_2 \quad \underline{V}].$$

$\underline{N}_1$  és  $\underline{N}_2$  a kétoldali csomópontok indexeit tartalmazó oszlopvektorok.

Az  $\underline{NCTV}$  mátrix kigyűjtésekor kihasználom, hogy a redukált  $\underline{A}$  mátrixból a földpontot hagytam el. Tehát vezetékdarabot tartalmazó ágban az oszlopösszeg zérus. Hiszen villamos kétpólus, a neve is mutatja hogy két kivezetése van, irányított gráf esetén egy csomópontból indul és egy csomópontba fut be, ahol egyik csomópont sincsen földpotenciálon. Legyen  $p$  a villamos hálózat rezisztív elemeket tartalmazó ágainak darabszáma. Felírható, hogy:

$$\underline{V} = [V_1 \quad V_2 \quad \dots \quad V_p]^T,$$

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, p\} : \sum_{j=1}^m \underline{A}_{j, V_i} = 0$$

A csomópontokat tartalmazó oszlopvektorok:

$$\underline{N}_1 = [N_{11} \quad N_{12} \quad \dots \quad N_{1p}]^T,$$

$$\underline{N}_2 = [N_{21} \quad N_{22} \quad \dots \quad N_{2p}]^T.$$

Ha egy rezisztív elemet tartalmazó él egy csomópontot elhagy, és egy másikba tart, akkor az  $\underline{NCTV}$   $j$ -edik,  $j = \{1, 2, \dots, p\}$  sorában található élekre igaz a következő:

$$\exists i \in \{1, 2, \dots, n\} : \underline{A}_{N_{1j}i} = 1, \underline{A}_{N_{2j}i} = -1,$$

vagy

$$\exists i \in \{1, 2, \dots, n\} : \underline{A}_{N_{1j}i} = -1, \underline{A}_{N_{2j}i} = 1, .$$

---

**Algoritmus 2** NCTV generálása

---

**INPUT:**  $A, Y, m, n$ **OUTPUT:**  $NCTV$ 

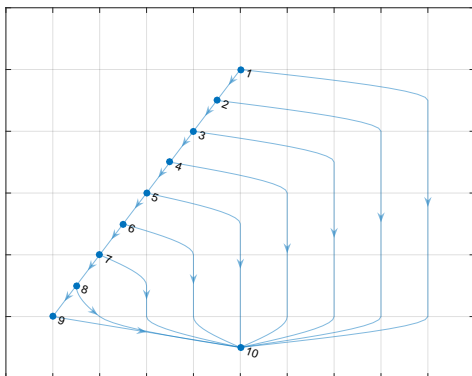
```
1:  $p = 1$ 
2: for  $i = 1$  to  $n$  do
3:   if  $R(i) \neq 0$  then
4:      $tmp = [0\ 0\ 0]$ 
5:     for  $j = 1$  to  $m$  do
6:       if  $A(j, i) = 1$  then
7:          $tmp(1, 1) \leftarrow j$ 
8:       end if
9:       if  $A(j, i) = -1$  then
10:         $tmp(1, 2) \leftarrow j$ 
11:      end if
12:    end for
13:     $tmp(1, 3) \leftarrow i$ 
14:     $NCTV(p, :) \leftarrow tmp$ 
15:     $p \leftarrow p + 1$ 
16:  end if
17: end for
```

---

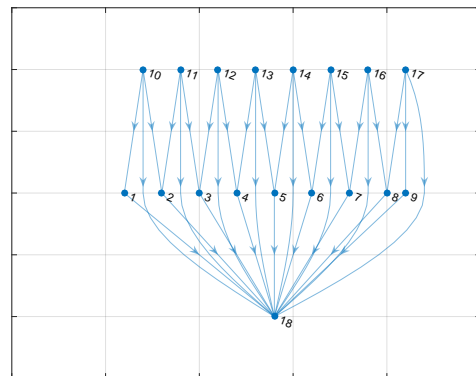
A beillesztendő elemek paramétereit pedig a  $\underline{DNP}$  mátrix adja meg. Szintén a fentebb ismertetett  $\underline{DNP}$  vektor mátrixos alakja, mivel több "dummy" csomópont beillesztési értékeit tartalmazza:

$$\underline{DNP} = [\underline{R}_1, \underline{R}_2, \underline{I}_{theft}].$$

$\underline{R}_1$  és  $\underline{R}_2$  a kétoldali ellenállások értékeit tartalmazó oszlopvektorok,  $\underline{I}_{theft}$  pedig a beillesztett csomópontokhoz kapcsolódó, próbaáramok áramai.



(a) Hálózat gráfja



(b) Kibővített hálózati gráf

6. ábra. Egy ponton táplált hálózat

A legenerált  $\underline{NCTV}$  mátrix minden egyes sorára elvégezve a csomópont beillesztése algoritmust, megkapjuk a teljes kibővített hálózatot (lásd 6. ábra).

## 4. Detekciós eljárás

Ahhoz hogy a evolúciós algoritmust tudjak alkalmazni detekciós célra szükséges generálni egy populációt, mely több generáción keresztül fejlődik. A populáció egyedeinek leírására az ismertetett DNP mátrixot használom fel. A hálózatba beillesztett fogyasztók helyzet és áramát tartalmazva alkalmas technológiailag indokolatlan veszteség feltárására.

$$E_i = [R_{11} \ I_{theft1} \ R_{12} \ I_{theft2} \ \dots \ R_{1p} \ I_{theftp}]$$

Az egyedben elegendő csupán az új csomópontához tartozó egyik vezeték ellenállását feltüntetni, hiszen az adott  $R_{21}, R_{22}, \dots, R_{2p}$  értéke meghatározható az eredeti ág ellenállásának és az egyedbeli ellenállás különbségként. A populáció generálásakor az  $I_{theft}$  értékek véletlenszerűen kerülnek generálásra úgy, hogy  $\sum_{i=1}^p I_{thefti} = I_{deficit}$ , ahol  $I_{deficit} = I_{feeder} - I_{nominal}$  a betáplálási pontra nézve. Az egyed ellenállás értékeit pedig a  $(1, \dots, R_i)$  nyílt intervallumból generálom, ahol  $R_i$  az eredeti ág ellenállása. Tehát  $R_{12} = rnd(1, \dots, R_i)$ ,  $R_{21} = R_i - R_{12}$ .

Következő fontos lépés egy fitness függvény megállapítása. Jelen az adott egyed által reprezentált hálózat csomóponti számítása során kapott eredmények és a mért feszültségesés közti eltérés a célra vezető.

$$F_i = max(abs(\phi_{measured} - phi_{simulated}))$$

Hiszen arra törekedünk, hogy a populáció egyedeinek potenciál értékei minél jobban a mért feszültségeket közelítsék. Ezáltal a valós üzemállapotot imitálják, és szolgáltatassanak információt, a kipótolt fogyasztók helyéről és fogyasztásukról.

A szelekció során tehát minél kisebb az  $F_i$  értéke, annál jobb az egyed. Az egyedek keresztezésére egy pontos keresztezést alkalmazok. Mutáció során pedig az  $i$ -edik egyed áramerősségét vagy az ellenállás értékét változtatja meg az algoritmus véletlenszerűen.

---

### Algoritmus 3 Detekciós eljárás

---

**INPUT:**  $iter_{limit}, popsize, phi_{measured}, A, R, I_a, U_v,$

**OUTPUT:**  $FinalNetwork$

- 1: NCTV generálása
  - 2:  $P_{t_0} \leftarrow$  Populáció generálása
  - 3: **for**  $i = 1$  to  $popsize$  **do**
  - 4:      $E_i$  behelyettesítése a hálózati mátrixokba
  - 5:      $\phi_{simulated} \leftarrow$  Csomóponti potenciálok számítása
  - 6:      $F_i \leftarrow max(abs(\phi_{measured} - phi_{simulated}))$
  - 7: **end for**
  - 8:  $t \leftarrow 0$
  - 9: **while**  $t < iter_{limit}$  **or**  $min(F) = 0$  **do**
  - 10:      $P_{t+1} \leftarrow$  Legjobb egyedek szelekciója
  - 11:      $P_{t+1} \leftarrow$  Szelekció a maradék helyekre
  - 12:      $P_{t+1} \leftarrow$  Keresztezés
  - 13:      $P_{t+1} \leftarrow$  Mutáció
-



---

```

14:   for  $i = 1$  to  $popsize$  do
15:        $E_i$  behelyettesítése a hálózati mátrixokba
16:        $\phi_{simulated} \leftarrow$  Csomóponti potenciálok számítása
17:        $F_i \leftarrow \max(abs(\phi_{measured} - phi_{simulated}))$ 
18:   end for
19:    $t \leftarrow t + 1$ 
20: end while
21:  $FinalNetwork \leftarrow P(index(min(F)))$ 

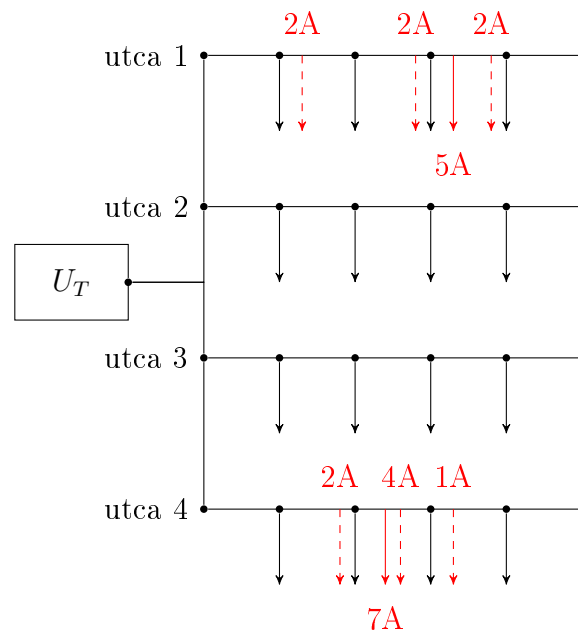
```

---

Az evolúciós eljáráshoz tapasztalati úton tartozó paraméter értékek: a populáció mérete a hálózat méretétől függően változik, azonban az iterációk száma mérettől független 50–80, az elitráta 0.15 és 0.05 a mutációs arány.

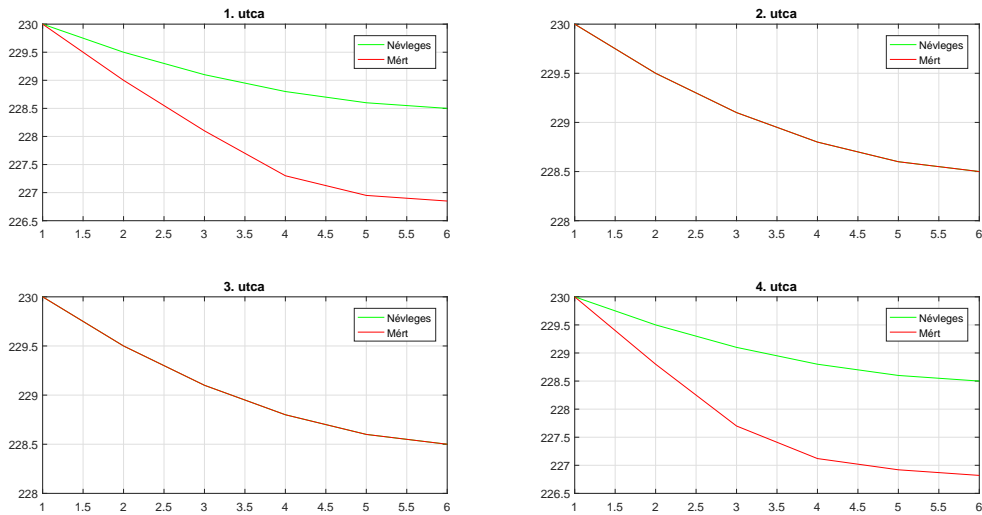
## 5. Szimulációs eredmények

Teszt szimulációként egy 4 utcából álló egy ponton táplált hálózatot készítettem (lásd 7. ábra). Melyben a fekete fogyasztók egységesen  $1[A]$ , a vezetékek  $0.1[\Omega]$  értékűek. Ebbe a hálózatba beillesztettem két nem regisztrált fogyasztót (folytonos piros nyilak). A betáplálási ponton az áram deficit értéke  $12[A]$ .



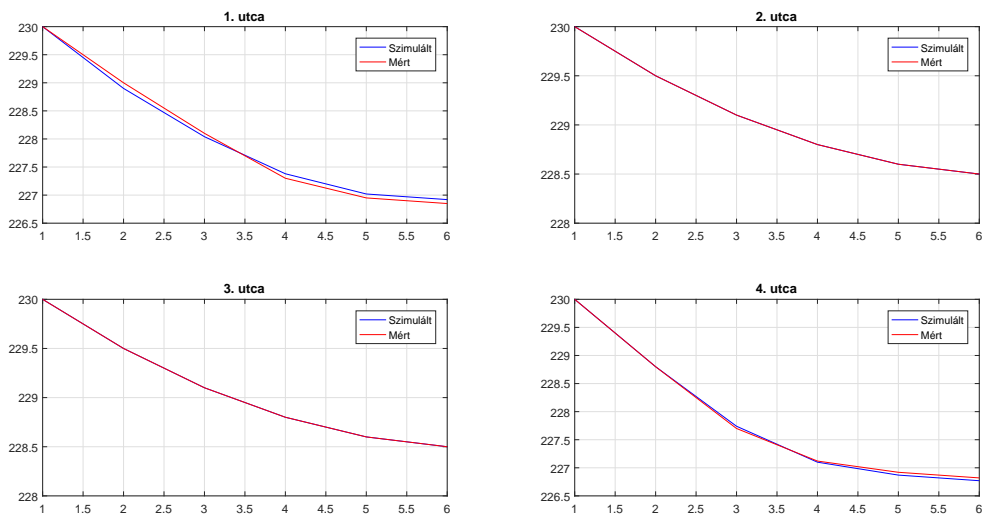
7. ábra. Teszthálózat

Egy kezdeti csomóponti analízist elvégezve látható, hogy a hálózat névleges terheléséhez tartozó feszültségek, nem egyeznek meg a mért értékekkel (lásd 8. ábra). Indokolt egy átfogóbb detekciós eljárás lefuttatása. Melynek eredményeképpen az elvárás, hogy plusz fogyasztók beillesztésével a mért görbét közelítsük meg. 15 fogyasztó esetén a genetikai algoritmus populációját 2000-nek választottam, melyet 80 iteráción keresztül fejleszt az eljárás. Az eljárás eredményeképpen kapott végleges hálózatot az egyedleírásnak megfelelő formátumban kapom meg. Mely egy sorvektor és kevésbé szemléletes, ezért az eredményeket a hálózatba láthatjuk szaggatott vörös vonalakkal jelölve.



8. ábra. A névleges és mért feszültségek

Jól látható az alábbi grafikonokon, hogy a szimulált hálózat feszültségei jól közelítik az eredeti hálózat értékeit.



9. ábra. Detekciós eljárás eredmények

## 6. Konklúzió

Bemutatásra került egy eljárás kifestültségű villamos hálózatban történő nem mért vételezés detektálására evolúciós algoritmus segítségével. Ismertettem a szükséges villamosságtani és gráfelméleti ismereteket. Kidolgoztam a hálózatot leíró fundamentális incidencia és egyéb mátrixok kibővítésére egy lehetséges algoritmust. Ezt felhasználva összeállítottam az evolúciós algoritmust, mely a kibővített hálózatot paraméterezi úgy, hogy szimulált eredmények minél kisebb abszolút hibával közelítsék a mérési eredményeket. Az eljárást egy szimuláción keresztül szemléltettem. Jól látható, hogy az algoritmus alkalmas nem

mért vételezés detektálására. Az eredmények azt mutatják, hogy meg tudja határozni a nem mért vételezések egy biztos környezetét, hot-spot-szerűen. Az eljárás további fejlesztésre alkalmas. Büntető függvény segítségével orvosolható, hogy az eljárás ne preferáljon több áramot behozni mutáción keresztül az egyenletekbe, mint amennyi a deficit által meghatározott mennyiség. Illetve a detekció által feltárt környezeteket szűkíteni tudom, ha egymás után többször futtatom az eljárást, és a deficit áramot, az előzőleg detektált környezeteknek megfelelően osztja el az algoritmus.