

ELOSZTÓHÁLÓZATOK ÁLLAPOTBECSLÉSÉNEK EGY ÚJ MÓDSZERÉRŐL

SINGER DÉNES*

[Beérkezett 1980. január 29-én]

A tanulmány eljárást mutat be elosztóhálózatok közvetlenül nem mért állapotváltozónak becslésére. Ellentétben az ismert módszerekkel, nem tételezi fel, hogy a kiinduló adatok redundáns mennyiségben állnak rendelkezésre, sem, hogy a rendszer lineáris legyen. Az állapotbecslés két fokozatban történik. Először a hálózati terhelésekre vonatkozó hosszútávú statisztikai adatok alapján a hálózat pillanatnyi csomóponti terhelésére előbecslést ad, majd ezt azon az alapon finomítja, hogy az előbecslés alapján számított csomóponti jellemzők — azokban a csomópontokban, amelyekben mérőműszerek vannak elhelyezve — az ezek által szolgáltatott adatokat a legkisebb négyzetek elve alapján optimálisan közelíti. A közelítés lineáris becslések sorozatának eredményeként adódik.

1. Bevezetés

Nem szorul külön magyarázatra, milyen szerepe van az ellenőrző műszereknek olyan nagy területekre kiterjedő rendszereknél, mint az elosztóhálózatok. Ezek hiányában a hálózat üzemeltetése rendkívül nehézkessé válnék, sőt lehetetlen lenne, amennyiben a rendszer nem lett volna eleve erősen túlméretezve. Másrészt a műszerek és az adatok begyűjtésére szolgáló rendszer a hálózat beruházási és üzemeltetési költségeinek tetemes hányadát teheti ki. Különösen vonatkozik ez a nem-elektromos hálózatokra, ahol a bonyolult mechanikus érzékelők és mérőátalakítók számának növelése nemcsak a beruházási költséget növeli, de ezek lényegesen nagyobb karbantartási igénye miatt az üzemeltetési költségeket is (hazai viszonylatban a gázhálózatoknál egyetlen mérőhely és hozzátartozó távközlési berendezés létesítése meghaladhatja a 3 millió Ft-ot. Ebbe az összegbe nincs beleszámítva a központi adatgyűjtő berendezés költsége).

A probléma tehát adott és lényegében azonos a becsléselemélet alapproblémáival: miként lehetséges minimális számú érzékelő által szolgáltatott idősor alapján valamely rendszer állapotáról maximális információt nyerni? A villamos hálózatok állapotbecslésére vonatkozó kutatások a hatvanas évek közepén indultak el. Ezek a munkák támaszkodhattak a lineáris becsléselemélet fejlett mátrixos módszereire és a lineáris hálózatok elméletének ugyancsak mátrixos reprezentációjára [1], [2], [3]. A magyar olvasó egyébként abban a kellemes helyzetben van, hogy mindkét témában magas színvonalú munkákra támaszkodhatik [4], [5], [6], [7].

A *nemlineáris hálózatok*, mint a gáz, víz fűtőhálózatok stb. állapotbecsléseinek módszertana ez ideig kezdeti stádiumban van. A nehézségek oka az, hogy itt nem használhatók a probléma megoldását zárt alakban lehetővé-

* Dr. Singer Dénes, 1021 Budapest, Nyéki u. 9

tevő mátrixos módszerek. Az eddigi kezdeményezések ezért a nemlineáris programozás numerikus kereső módszereihez folyamodnak. Ezek használata azonban még a jelenlegi nagy teljesítőképességű számítógépek alkalmazása mellett is illuzórikus. A másik nehézség, hogy ellentétben a viszonylag jól műszerezett villamos hálózatokkal, a nem-villamos hálózatoknál a becslés számára viszonylag kevés közvetlen adat áll rendelkezésre. A tanulmány szerzőjének véleménye szerint a hálózatbecslésnél nagy szerep jut a becslés alapjául szolgáló adatok *előrebecslésének*.

A tanulmány a továbbiakban egy nemlineáris hálózatok céljaira is alkalmas kétfokozatú becslési eljárást mutat be. Először a hálózati terhelésekre vonatkozó hosszútávú statisztikai adatok alapján előbecslést ad a hálózat pillanatnyi csomóponti terheléseiről, majd ezeket azon az alapon finomítja, hogy az előbecslés alapján számított csomóponti jellemzők (nyomások, potenciálok) — azokban a csomópontokban, amelyekben mérőműszerek vannak telepítve — az ezek által szolgáltatott adatokat a legkisebb négyzetek elve (LN-módszer) alapján közelíti. A közelítés lineáris becslések sorozatának eredményeként adódik.

2. Az elosztóhálózat csomóponti terheléseinek előrebecslése

A következő feltételezésekből indulunk ki:

- a) A hálózat üzemállapota stacionáriusnak tekinthető. Nagyfogyasztók be- és kikapcsolási folyamataitól eltekintve ez a feltétel általában teljesül.
- b) Az egyes fogyasztói csomópontokon viszonylag nagyszámú fogyasztó csüng, melyek jellegbeli megoszlása a különböző csomópontokban azonos képet mutat.
- c) A források (termelőhelyek, átadóállomások) által szolgáltatott árammennyiségeket, valamint a nagyfogyasztók fogyasztásait folyamatosan regisztrálják.
- d) A hálózat n számú csomópontja közül n_M számban ($n > n_M > 0,1$) a potenciálokat (villamos hálózatoknál a feszültségeket, gáz- és vízhálózatoknál a nyomásokat) regisztrálják.

Feltételezzük továbbá, hogy a hálózat számítógépes adatkezelő rendszere tartalmazza a hálózat topológiájára, az ágakra, valamint az egyes fogyasztók ágakra való kapcsolódásának helyére vonatkozó törzsadatokat, továbbá azok fogyasztásmérőin periodikusan leolvasott és manuálisan, számlázás céljából begyűjtött adatokat.

Mivel a fogyasztók általában az ágakhoz kapcsolódnak és további megfontolásainkban csakis csomóponti terhelésekkel operálunk, a fogyasztási

adatok a megfelelő csomópontokra vonatkoztatandók. Az egyes csomópontokra érvényes 1. Kirchhoff-törvény alapján a hálózat anyagmérlege

$$\sum_{i=1}^n W_{Ai}(t) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{b_i} W_{Bij}(t) - \sum_{i=1}^n W_{Si}(t) = 0, \quad (1)$$

$W_{Si}(t)$ az i -edik csomópont forrásárama, $W_{Ai}(t)$ az i -edik csomópont fogyasztás mérőműszerrel *nem* rendelkező fogyasztóinak összfogyasztása (A -típusú fogyasztás), $W_{Bij}(t)$ a fogyasztásmérő műszerrel *rendelkező* (nagyobb) felhasználók fogyasztása (B -típusú fogyasztás) az i -edik csomóponton, b_i ezek száma, n a csomópontok száma.

A b) és c) feltételezések alapján az egyes A -típusú csomóponti fogyasztások időlefutása ezen lefutások összes csomópontra vonatkozó összegéből

$W^*(t) = \sum_{i=1}^n W_{Ai}(t)$ -től csak egy c_i szorzófaktorban különbözik:

$$W_{Ai}(t) = c_i W^*(t) \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Az (1) alapján

$$W^*(t) = \sum_{i=1}^n W_{Si}(t) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{b_i} W_{Bij}(t). \quad (3)$$

A c_i faktorok meghatározásához további plauzibilis feltételezéssel élünk: Feltételezzük, hogy a (2) összefüggés érvényes a $W_{Ai}(t)$ évi középértékére is, vagyis

$$c_i = \frac{\overline{W_{Ai}(t)}}{\overline{W^*(t)}}. \quad (4)$$

A $\overline{W^*(t)}$ középérték az árammérő műszerek adatai alapján a (3) figyelembevételel meghatározható. Az A -típusú felhasználóknak az egyedi fogyasztásmérőkön leolvasott adatai alapján, a számítógépes hálózati nyilvántartás felhasználásával, a $\overline{W_{Ai}(t)}$ csomóponti átlagfogyasztások ugyancsak meghatározhatók.

Vektorális alakban a hálózat pillanatnyi csomóponti terhelései a következőképpen írhatók:

$$W(t) = W_A(t) + W_B(t), \quad (5)$$

ahol $W_A(t)$, $W_B(t)$, az A , B típusú felhasználók csomóponti áramainak vektorait jelentik. A hibával terhelt $W(t)$ vektort, a hiba nélkülötől megkülönböztetendő $\widetilde{W}(t)$ -vel, vektor optimális becsléssel nyert értékét $\widehat{W}(t)$ -vel jelöljük. A $W(t)$ $\mu_A(t)$ valószínű hibájaként a két vektor különbségét deklaráljuk

$$\widehat{W}(t) = \widetilde{W}(t) + \mu(t). \quad (6)$$

A $W(t)$ hibája teljes egészében a csomópontok A típusú terheléértékek hibáiból származik, mivel a műszerhibákat a pszeudomérések hibái mellett elhanyagolhatónak tekinthetjük.

Amennyiben a $\mu(t)$ hiba zérus értékkel bírna, a hálózat állapotváltozóit, a csomóponti potenciálok vektora $e(t)$

$$e(t) = F[W(t)] \quad (7)$$

hálózati egyenlet alapján meghatározható lenne. Mivel $\mu_A(t) \neq 0$ az $e(t)$ csomóponti potenciálokra csak becslések adhatók. A becslések jóságának megítéléséhez elsősorban egy jósági indexet szükséges definiálni. Esetünkben célszerű az R jósági indexet úgy definiálni, hogy a $\hat{W}(t)$ becsült értékekkel a (7) alapján számított $e(t)$ potenciálvektor azokban a csomópontokban, melyekben műszeres mérések vannak, a legkisebb négyzetösszeg elve alapján *minimális* értéket vegyen fel. Az R jósági index így

$$R = E\{(e_M - e_M^{\text{mért}})^T \Theta (e_M - e_M^{\text{mért}})\} \quad (8)$$

alakkal bír, ahol $e_M^{\text{mért}}$ a mérőműszerekkel ellátott csomópontokban mért potenciálok vektora, e_M a (7) alapján az (5) csomóponti terhelésektől számított csomóponti potenciálok vektora, Θ egy súlyozó mátrix. Az e vektort particionálva, a mérőműszerrel ellátott és az ezeket nélkülöző csomópontok szerint

$$e = [e_M e_U] \quad (9)$$

a (7) egyenlet a következő alakra hozható

$$e_M(t) = F_1[W(t)], \quad (10)$$

$$e_U(t) = F_2[W(t)]. \quad (11)$$

Ha a fenti értelemben optimális az e_M becslése, vagyis ha $R \rightarrow \min$ és $e_M = \hat{e}_M$, a (9) alapján optimális becslést adhatunk $W(t)$ -re vonatkozólag

$$W(t) = F_1^{-1}[\hat{e}_M(t)], \quad (12)$$

ahol F_1^{-1} az F_1 inverz vektor függvényét jelöli.

3. A hálózat egyenletek linearizálása

A mondottak alapján az elosztóhálózat állapotának becsléséhez ennek egyenleteit a (10), (11) particionált alakban kell előállítani. Ezen feladat továbbá, hogy az R jósági index minimumát algebrai módszerekkel lehessen

meghatározni — amennyiben nem lineáris hálózatról van szó —, a hálózati egyenlet linearizálását igényli. A linearizálás történhetik csonkított Taylor-sorba fejtéssel, vagy egy a hálózatelemzés módszertana szempontjából megfelelőbb módszerrel a „helyettesítő modellek” (companion model) módszerével [8]. A módszer a hálózat ágegyenleteinek nem-linearitását, miután az ágak nem-lineáris vezetőképességét a lineáris G vezetőképességgel helyettesítette, egy virtuális J ágforrásárammal veszi figyelembe. Rekurzív eljárásról van szó, melynél a G és J értékei az előző lépésben nyert értékek alapján kerülnek meghatározásra. Az $i = f(v)$ nem lineáris ágegyenlet alapján — ahol f egy tetszőleges monoton, végezzámú törésponttal rendelkező függvény — a rekurzió $(m + 1)$ -edik lépésében az i ágáram első közelítésben kifejezhető a következő módon

$$i^{m+1} = i^m + \left[\frac{\partial i}{\partial v} \Big|_{v=v^m} (v^{m+1} - v^m) \right]. \tag{13}$$

A beszorzást elvégezve és átrendezve az

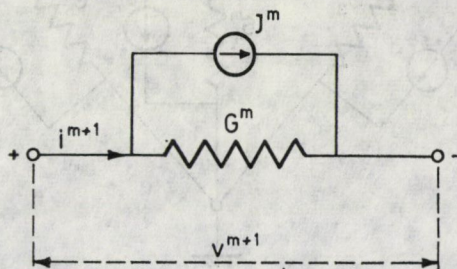
$$i^{m+1} = G^m v^{m+1} + (i^m - G^m v^m) \tag{14}$$

kifejezés adódik, ahol $G^m = \partial i / \partial v |_{v=v^m}$ a helyettesítő lineáris ág vezetőképessége. A (14) jobboldalán zárójelben álló kifejezést, mint egy J^m ágforrásáram értelmezhető (1. ábra).

A mondottak szemléltetésére alkalmazzuk a módszert egy erősen nem lineáris hálózatra, a magasnyomású gázhálózatra. A gázhálózat ágainak nyomásesése a következő összefüggésből számítható

$$p_1^2 - p_2^2 = kq^2 \tag{15}$$

ahol p_1 és p_2 a két végpont nyomása, q a gázáram (normál térfogaton és nyomáson), k egy az ág hosszából, átmérőjéből, valamint a gáz fizikai jellemzőiből számítható állandó. Tekintve, hogy a (15) úgy a p nyomásokban, mint a q áramokban nemlineáris — az ágegyenletet az $i = f(v)$ alakra hozandó — új Π_j csomóponti potenciálokat vezetünk be a következő definíció alapján: $\Pi_j =$



1. ábra

p_j^2 . Az ágegyenlet így a

$$q = \left(\frac{1}{k}\right)^{1/2} (\Pi_1 - \Pi_2)^{1/2} = Kv^{1/2} \quad (16)$$

alakot nyeri, ahol a Π_1, Π_2 csomóponti potenciálok különbséget (az ághajtó-erőt) v -vel jelöltük és $K = \left(\frac{1}{k}\right)^{1/2}$ jelölést vezettünk be.

A gázhálózat ágainak helyettesítő modelljében szereplő G^m vezetőképesség és J^m forrásáram számára a (14) és (16) alapján a következő kifejezések adódnak

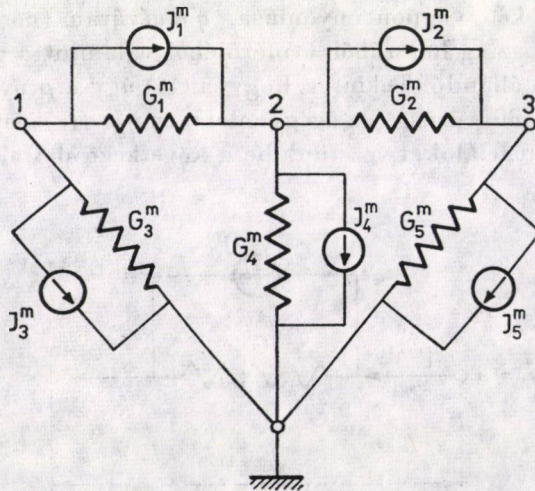
$$G_j^m = \frac{1}{2} K_j v_j^{1/2} \Big|_{v_j=v_j^m}; \quad J_j = -\frac{1}{2} K_j v_j^{1/2} \Big|_{v_j=v_j^m} \quad (17)$$

Itt j az ágindex.

Az ágakat az eredeti gázhálózati sémában a megfelelő helyettesítő modellekkel felcserélve ennek linearizált sémája adódik (2. ábra). A lineáris hálózat változói közötti összefüggések közül számunkra elsősorban a csomóponti potenciálok bázispontra vonatkoztatott értékei és a csomóponti terhelések (források és fogyasztók) között fennálló összefüggések jelentősek. A csomóponti potenciálok a hálózat bázispontjára vonatkozó értékeinek vektorát e -vel jelölve, ez a következő alakkal bír [5].

$$e = -[AGA^T]^{-1} [W_a - AGV + AJ] \quad (18)$$

ahol A a hálózat ágcsompont incidencia mátrixa, G az ágvezetés mátrixa W_a a csomóponti források és fogyasztások vektora, J és V az ágforrásáramok, illetve az ágforráspotenciálok vektora.



2. ábra

A (18) a hálózat lineáris helyettesítő modelljére közvetlenül alkalmazható

$$e^{m+1} = -[AG^m A^T]^{-1} [W_e^m + W_c^m], \quad (19)$$

ahol $W_e^m = (W_a - AG^m V)$, $W_c^m = AJ^m$; W_e^m a tényleges, W_c^m a hálózat nem-linearitásaiból származó virtuális csomóponti terhelések vektorát jelenti. A nagynyomású gázhálózatoknál

$$G^m = \frac{1}{2} K \operatorname{diag} \{A^T(e^{-1/2})\} \Big|_{e=e^m} \quad (20)$$

$\operatorname{diag} [A^T(e^{-1/2})]$ az $A^T(e^{-1/2})$ vektor diagonálásával nyert mátrix, K az ágak K_j faktorainak diagonális mátrixa

$$W_c^m = -\frac{1}{2} AK[A^T(e^{1/2})]_{e=e^m}. \quad (21)$$

Mivel a (17) a G^m -et és J^m -et a $v = \Pi_1 - \Pi_2$ függvényeként állítja elő, ezeket a (20) és (21)-ben

$$v = A^T e$$

összefüggés alapján az e csomóponti potenciálok függvényében adtuk meg (ezek értéke ugyanis az előző rekurzív lépésből ismert).

A (21)-ben szereplő csomóponti admittancia mátrixot, $[AG^m A^T]$ -t, Y^m -el, a $W_e + W_c^m$ összegvektort W^m -el jelölve, az elosztó-hálózat egyenletének lineáris rekurzív alakja

$$e^{m+1} = [Y^m]^{-1} W^m; \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (22)$$

lesz. A számítás mindaddig folytatandó, amíg $|e^{m+1} - e^m| < \varepsilon$ lesz, ahol ε egy a pontossági igényeket kifejező vektor.

4. A hálózat particionálása és a rekurzív állapotbecslés algoritmus

Az állapotbecslés (9)-ben definiált R jósági indexének meghatározásához a hálózati egyenleteket a (10), (11) alakra kell hozni. Ebből a célból az Y^m csomóponti admittancia mátrixot részmatrixokra bontjuk

$$Y^m = \begin{bmatrix} Y_{11}^m & Y_{12}^m \\ Y_{21}^m & Y_{22}^m \end{bmatrix}, \quad (23)$$

ahol $Y_{11}[n_M \times n_M]$, $Y_{12}[n_M \times n_U]$ a mérőműszerekkel ellátott, $Y_{21}[n_U \times n_M]$ és $Y_{22}[n_U \times n_U]$ a nem mért csomópontoknak felelnek meg; n_M és n_U a mért illetve nem mért csomópontok száma. Ez a dekompozíció könnyen elvégezhető, amennyiben először a műszerrel ellátott csomópontokat számozzuk be,

majd ezután a műszer nélkülieket. Az A csomópontág incidenciamátrix így nyert

$$\begin{aligned} & \mathbf{A}_{11}[n_M x n_M], \mathbf{A}_{12}[(b - n_M)x n_M]; \mathbf{A}_{21}[n_U x (b - n_M)], \\ & \mathbf{A}_{22}[(b - n_M)x (b - n_M)], \quad (b \text{ az ágak száma}), \end{aligned}$$

részmatrixai és az ugyancsak részmatrixokra bontott \mathbf{G}^m vezetési mátrix segítségével az \mathbf{Y}_{k1}^m részmatrixok a következőképpen fejezhetők ki:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{11}^m &= \mathbf{A}_{11} \mathbf{G}_{11}^m \mathbf{A}_{11}^T + \mathbf{A}_{12} \mathbf{G}_{22}^m \mathbf{A}_{21}^T; \mathbf{Y}_{12}^m = \mathbf{A}_{11} \mathbf{G}_{11}^m \mathbf{A}_{21}^T + \mathbf{A}_{12} \mathbf{G}_{22}^m \mathbf{A}_{22}^T, \\ \mathbf{Y}_{21}^m &= \mathbf{A}_{21} \mathbf{G}_{11}^m \mathbf{A}_{11}^T + \mathbf{A}_{22} \mathbf{G}_{22}^m \mathbf{A}_{21}^T; \mathbf{Y}_{22}^m = \mathbf{A}_{21} \mathbf{G}_{11}^m \mathbf{A}_{21}^T + \mathbf{A}_{22} \mathbf{G}_{22}^m \mathbf{A}_{22}^T. \end{aligned} \quad (24)$$

Az \mathbf{Y}^m mátrix inverziója a részmatrixokból álló mátrixok inverziójára vonatkozó ismert szabályok alapján elvégezhető [9]:

$$[\mathbf{Y}^m]^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{11}^m & \mathbf{S}_{12}^m \\ \mathbf{S}_{21}^m & \mathbf{S}_{22}^m \end{bmatrix} \quad (25)$$

ahol \mathbf{S}_{k1}^m részmatrixok a következő mátrixkifejezéseket jelentik:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{11}^m [n_M x n_M] &= \mathbf{Y}_{11}^m + (\mathbf{Y}_{11}^m)^{-1} \mathbf{Y}_{12}^m [\mathbf{Y}_{22}^m - \mathbf{Y}_{21}^m \mathbf{Y}_{11}^m \mathbf{Y}_{12}^m]^{-1} \mathbf{Y}_{21}^m \mathbf{Y}_{11}^m, \\ \mathbf{S}_{12} [n_M x n_U] &= -\mathbf{Y}_{11}^m \mathbf{Y}_{12}^m [\mathbf{Y}_{22}^m - \mathbf{Y}_{21}^m \mathbf{Y}_{11}^m \mathbf{Y}_{12}^m]^{-1}, \\ \mathbf{S}_{21} [n_U x n_M] &= -[\mathbf{Y}_{22}^m - \mathbf{Y}_{21}^m \mathbf{Y}_{11}^m \mathbf{Y}_{12}^m]^{-1} \mathbf{Y}_{21}^m \mathbf{Y}_{11}^m, \\ \mathbf{S}_{22} [n_U x n_U] &= \mathbf{Y}_{22}^m - \mathbf{Y}_{21}^m \mathbf{Y}_{11}^m \mathbf{Y}_{12}^m. \end{aligned} \quad (26)$$

A \mathbf{W}^m terhelésvektort szintén particionálva, a nyomásmérővel ellátott, illetve e nélküli csomópontok szerint

$$\mathbf{W}^m = [\mathbf{W}_M^m \mathbf{W}_U^m]$$

a (22) kifejezés a következőképpen írható

$$\begin{bmatrix} e_M^{m+1} \\ e_U^{m+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{11}^m & \mathbf{S}_{12}^m \\ \mathbf{S}_{21}^m & \mathbf{S}_{22}^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_M^m \\ \mathbf{W}_U^m \end{bmatrix}, \quad (27)$$

vagy kifejtve

$$e_M^{m+1} = \mathbf{S}_{11}^m \mathbf{W}_M^m + \mathbf{S}_{12}^m \mathbf{W}_U^m, \quad (28)$$

$$e_U^{m+1} = \mathbf{S}_{21}^m \mathbf{W}_M^m + \mathbf{S}_{22}^m \mathbf{W}_U^m. \quad (29)$$

A nyert kifejezések általános érvényűek és bármely elosztóhálózatra alkalmazhatók.

Ezek után rátérhetünk a becslés R jósági indexének meghatározására. Az R (8)-ban adott definícióján túlmenően megkívánjuk, hogy a \mathbf{W} csomóponti terhelések becsléssel nyert értékei a \mathbf{W}_e előbecsléssel nyert értékeitől négyzetes középértékben csak minimálisan különbözzenek, vagyis hogy

$$(\mathbf{W}^m - \mathbf{W}_e)^T \Psi (\mathbf{W}^m - \mathbf{W}_e) \rightarrow \min \quad (30)$$

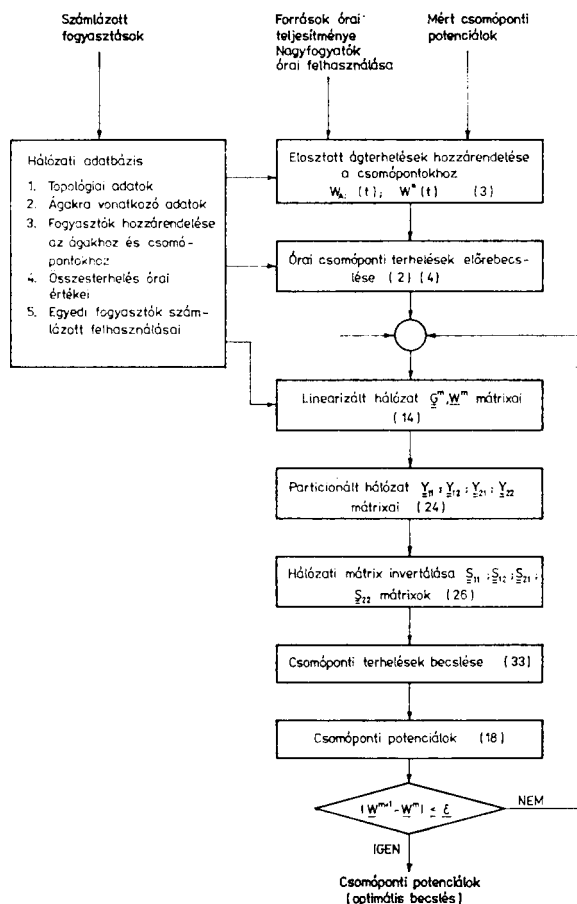
legyen. A (8), (28) és (30) alapján így

$$R^m = E\{(\mathbf{W}^m)^T \Theta (\mathbf{S}_1)^T \Theta \mathbf{S}_1^m \mathbf{W}^m - \tilde{e}_M^T \Theta \mathbf{S}_1^m \mathbf{W}^m - (\mathbf{W}^m)^T (\mathbf{S}_1^m)^T \Theta \tilde{e}_M + (\tilde{e}_M)^T \Theta \tilde{e}_M + (\mathbf{W}^m)^T \Psi \mathbf{W}^m - \mathbf{W}_e^T \Psi \mathbf{W}^m - (\mathbf{W}^m)^T \Psi \mathbf{W}_e + \mathbf{W}_e^T \Psi \mathbf{W}_e\}, \quad (31)$$

ahol $\mathbf{S}_1 = [\mathbf{S}_{11} \mathbf{S}_{12}]$, \tilde{e}_M a mért csomóponti potenciálok vektora, Θ és Ψ súlyozó mátrixok.

A hálózati terhelések értékének legjobb becslése a (31) szélső értékének meghatározásával történik. Mint skaláris esetben ehhez meghatározzuk a $dR^m/dW^m = 0$ egyenlet gyökeit. Az R^m skalárnak a \mathbf{W} vektor szerinti deriválásánál a következő szabályokat használjuk fel:

$$\frac{d c^T \mathbf{F} c}{d c} = 2 c^T \mathbf{F}; \quad \frac{d a^T c}{d c} = a^T.$$



3. ábra

Itt \mathbf{a} és \mathbf{c} tetszőleges oszlopvektorok, \mathbf{F} tetszőleges mátrix. Ennek alapján:

$$(\mathbf{W}^m)^T (\mathbf{S}_1^m)^T \Theta \mathbf{S}_1^m - (\tilde{\mathbf{e}}_M)^T \Theta \mathbf{S}_1^m + (\mathbf{W}^m)^T \Psi - \mathbf{W}_e^T \Psi = 0. \quad (32)$$

Átrendezve és a \mathbf{W}^m -re megoldva,

$$\mathbf{W}^m = [\mathbf{S}_1^m{}^T \Theta \mathbf{S}_1^m + \Psi]^{-1} [(\mathbf{S}_1^m)^T \Theta \tilde{\mathbf{e}}_M - \mathbf{W}_e]. \quad (33)$$

A \mathbf{W}^m a csomóponti terhelések vektorának optimális becslése az m -edik lépésben.

A $\mathbf{W}^m = [\mathbf{W}_M^m \mathbf{W}_U^m]$ vektor numerikus értékének a (27) egyenletbe történő visszahelyettesítésével a csomóponti potenciálok javított értékei adódnak. Ezek felhasználásával a \mathbf{G} és \mathbf{J} virtuális ágadmittancia, illetve forrásárammértékek nyerhetők. (A példaként tárgyalt gázhálózat esetében ehhez a (20) és (21) kifejezések szolgálnak.) Az új \mathbf{G} és \mathbf{J} (illetve \mathbf{W}_e) értékek alapján javított \mathbf{Y} és \mathbf{S} mátrixok számíthatók, melyek végül is a (33)-ba helyettesítve, a jósági index $(m + 1)$ -edik lépésben érvényes optimális becslését adja stb. Az eljárás mindaddig folytatandó, amíg $|\hat{\mathbf{W}}^{m+1} - \hat{\mathbf{W}}^m| < \varepsilon$. A $\hat{\mathbf{W}}^m$ így nyert végleges értékét a (27) egyenletbe visszahelyettesítve, az állapotjellemzők, a csomóponti potenciálok, optimális becslései adódnak.

Az optimális becslés leírt algoritmusinak folyamatábrája a 3. ábrán látható.

5. Befejező megjegyzések

Befejezésül néhány kvalitatív jellegű megállapítással szolgálunk a becslés jóságáról, a módszer stabilitásáról és a gépidőigényről.

A becslés jósága két tényezőtől függ:

a) a mérőműszerrel ellátott csomópontok és az ezekkel nem rendelkező csomópontok viszonyszámától,

b) a mérőműszerek térbeli eloszlásának egyenletességétől.

Abban — a gyakorlatban egyébként alig előforduló esetben —, amikor a műszerek a hálózat egyik részére volnának koncentrálnak, a becslés pontossága ezen a területen megnőne, de az egész hálózatra vonatkozó átlagos pontosság csökkenne.

A módszer konvergenciájáról a következő állapítható meg: Mint az iteratív eljárások általában, ezen eljárás sem abszolút konvergens. A módszerrel konvergencia javító tényezőként kell értékelni azt a körülményt, hogy az egyes számítási ciklusokban a ciklusoóptimum véges lineáris becslési módszerrel kerül meghatározásra. Az instabilitás veszélye csökkenthető a virtuális ágadmittancia és ágforrásáramok \mathbf{G}° , illetve \mathbf{J}° induló értékeinek helyes megválasztásával. Erre a célra célszerű egy standard nagy teljesítményű, nem-

lineáris hálózatok elemzésére alkalmas programot használni, amely az előre-becsült W terhelésértékekhez meghatározza a megfelelő csomóponti potenciálokat [10].

A gépidőszükségletet a hardware adottságokon és a rendelkezésre álló mátrixkezelő software teljesítményén kívül a hálózat mérete és az n/n_M viszonyszám szabja meg. A másik tényező a szükséges lépésszám, amely a nem linearitások „erősségének” függvénye. A lineáris hálózat állapotbecslése csupán egyetlen lépést igényel.

IRODALOM

1. SCHWEPPE, F. C.—WILDES, J.: Power System Statistic State Estimation. Exact Model. *Trans. IEEE PAS-89*, 1 (1970), 120—125
2. SCHWEPPE, F. C.—ROM, D. B.: Power System Static State Estimation. *Trans. IEEE PAS-89*, 1 (1970), 125—130
3. SCHWEPPE, F. C.: Power System Static Estimation. Implementation. *Tns. IEEE PAS-89*, 1 (1970) 130—135
4. GÉZER, K.: Lineáris hálózatok. 4. kiadás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1979
5. VÁGÓ, J.: A gráfelmélet alkalmazása villamos hálózatok számítására. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1976
6. BÁNYÁSZ, Cs.—KEVICZKY, L.: Discrete-Time Identification on Linear Dynamic Processes. *MTA SzTAKI Tanulmányok*, Budapest, 94 (1978)
7. GERTLER, J.: Egy sztatistikus szűrési eljárás folyamatirányításhoz. Doktori értekezés. *MTA SzTAKI Tanulmányok*, 94 (1979)
8. NAGEL, L.—ROHRER, R.: Computer Analysis of Nonlinear Circuits. *IEEE J. SC.* 6 (1971), 166—182
9. RÓZSA, P.: Lineáris algebra és alkalmazásai. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1974
10. SINGER, D.—ELEK, J.: Softwarefragen der Analyse. Projektierung und Steuerung von Gasnetzen. *Acta Techn. Hung.* 87 (1978), 391—406

On a New Method for the State Estimation of Distribution Nets — The paper gives an estimation method for the non-measured state variables of non-linear nets (gas and water nets, etc.). In contrast to other estimation methods, it is not assumed that input data are available in redundant quantity. The state estimation occurs in two steps. In the first a rough estimation of the node loads are calculated founded on long-time statistical data of the total network load and on some hypothesis concerning the structure of load distribution. In the second step the node load data are refined by an LS-estimation. The quality index of the estimation has a minimum if the calculated node potentials and the measured ones differs minimally. According to the non-linear character of the system, the estimation is executed as a *recursive* process of linear estimation steps.

Über eine neue Methode zur Schätzung von Zustandsvariablen bei Verteilungsnetzen. — Die Arbeit gibt eine neue Methode für die Abschätzung der nicht gemessenen Zustandsvariablen von nichtlinearen (Gas, Wasser) Netzen. Im Gegensatz zu bekannten Schätzungsverfahren, wird es nicht angenommen, daß die Messdaten in Überschuß vorliegen. Die Schätzung erfolgt in zwei Stufen. In der ersten werden rohe Schätzungswerte der Knotenpunktbelastungen aufgrund langfristiger statistischer Daten und gewisser Annahmen über die Struktur der Belastung abgeleitet. Im zweiten Schritt werden die Knotenpunktbelastungsdaten dadurch verfeinert, daß der Wert eines Qualitätsindexes minimiert wird, wodurch die berechneten Werte der Knotenpunktpotentiale — in jenen Punkten, wo Messungen vorliegen — diese optimal annähern. Gemäß des nichtlinearen Charakters der Netze stellt der Schätzungsprozess eine *rekursive* Folge von linearen Schätzungen dar.