

Újabb vizsgálatok a villamos távvezetékek terének geofizikai alkalmazhatóságára¹

TAKÁCS ERNŐ, PETHŐ GÁBOR²

A numerikus szimuláció és a kísérleti mérések alapján megállapítható, hogy a villamos távvezetékek elektromágneses tere már a távvezeték közvetlen közelében is fontos földtani információkat adhat. A laterális inhomogenitások helyének megkeresésére ajánlható a távvezetékkel párhuzamos szelvényeken a szomszédos — érintkező — elektróda-terítéseken mért feszültségek arányának térképezése, ami egészen egyszerű és olcsó műszerezettséggel, kedvező terepi teljesítménnyel megoldható. Ez a módszer célszerű — extra-, és interpolálási feladatú — kiegészítése lehet a hagyományos geoelektromos szelvényezéseknek és szondázásoknak. Az inhomogenitások rétegtani azonosítását és mélységi helyzetét a hagyományos mérések helyéhez való csatlakozással lehet biztosítani. Az azonosítás megoldhatóan látszik az 50 Hz felharmonikusainak mérésével is, amihez viszont már nagyobb érzékenységű szelektív feszültségmérőre — esetleg digitális jelrögzítésre — az elektromos és valamelyik mágneses komponens egyidejű mérésére, további elvi és terepi vizsgálatokra is szükség van.

E. TAKÁCS, G. PETHŐ: New results about the geophysical application of the electromagnetic field due to electric power lines

As it has been shown by using numerical forward modelling and experimental field measurements, the electromagnetic fields due to power lines can give geological information even in the vicinity of power lines. For the localisation of relatively near-surface lateral inhomogeneities, we recommend to construct a map about the ratio of electric field components measured in two neighbouring sites, along profiles parallel to the power line. Such a survey can be carried out easily, quickly and cheaply, and by means of a very simple instrumentation. This method may become a useful complementary tool of traditional geoelectric soundings. The stratigraphic identification and the depth position of the inhomogeneities are given from related traditional measurements. It is possible to obtain a vertical resolution from several upper harmonics of the fifty hertz, too. For such a frequency sounding, a simultaneous measurement of the electric and magnetic field components is needed, which requires multichannel, frequency-selective voltmeters of higher sensitivity – possibly with digital recording – as well as additional theoretical and field examinations.

1. Bevezetés

A villamos távvezetékek elektromágneses terének geofizikai felhasználásáról időről időre tanulmányok jelennek meg a szakirodalomban. Ezek általában a vezeték terének távoli zónájában végzett mérésekről szólnak. A távvezeték terét tehát síkhullámnak tekintik [MCCOLLOR et al. 1983; LABSON, MEDBERRY 1989; LABSON 1990; RISK, CALDWELL, BIBBY 1999].

A 70-es években eredményes hazai alkalmazások is voltak például a széntelepet harántoló vetők felszínhez közeli folytatásának kutatásában, vagy a kőbányászatban kőzetminősítési céllal [TAKÁCS 1979]. Ezek a mérések viszont a távoli zónára jellemző nagyobb távolságokhoz képest a távvezeték közvetlen környezetében történtek kvalitatív értelmezéssel.

A jelenleg rendelkezésünkre álló hatékony 3-D-s direkt feladatot megoldó programok már lehetőséget adnak a zónahatároktól függetlenül a kisebb távolságok melletti mérések lehetőségének teljesebb feltárására. A távvezetektől kis távolságra a térerősség nagy értéke, irányítottságának állandósága egyszerű műszerezettséggel nagy produktivitású méréseket tesz lehetővé. Egyes kutatási feladatoknál hasznos kiegészítői lehetnek a távvezeték közelében végzett hagyományos geoelektromos szelvényezésnek és szondázásnak.

2. A villamos távvezetékek elektromágneses tere és földtani információja

A nagy teljesítményű távvezetékek minimálisan három fázisvezetékkel és egy nullavezetékkel rendelkeznek. A fázisvezetékek árama egymáshoz képest 120 fokos fáziseltolással bír. A nullavezetékben pedig az egyes fázisvezetékek áramainak vektoriális összegével megegyező az áram. Szimmetrikus terhelésnél — fázisonként azonos amplitúdójú áramok — a nullavezetékben nem folyik áram, mert a 120 fokos fáziskülönbségek miatt nulla az eredő áramerősség. Aszimmetrikus terhelésnél a fázisok áramai különböznek és áramerősségük vektoriális összege már áramot eredményez a nullavezetékben is.

A távvezeték pillanatnyi áramerőssége számunkra ismeretlen módon változó lehet. Emiatt a térerősség-komponensek hányadosát kell mérni. A térerősség-változások jelentősek lehetnek, de hosszabb-rövidebb idő alatt mindig kialakul olyan helyzet, amikor a jel stabil marad.

A távvezetékek árama felharmonikusokat is tartalmaz, ami a hálózat nemlineáris elemeinek következménye. Közülük általánosak a transzformátorok. A mágneses hiszterézisgörbéből eredő torzításuk az áram időfüggvényének abszcisszájára szimmetrikus és emiatt páratlan felharmonikusokat hoznak létre. Nagyságrendben a páratlan számú felharmonikusok a dominánsak. Más elemek — például egyenirányítók — páros számú felharmonikusokat eredményeznek. Amplitúdójuk azonban kisebb. Megfelelő műszerekkel egyre csökkenő amplitúdóval több ezer Hz-ig

¹ Beérkezett: 2006. március 2-án

² Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék, H-3515 Miskolc, Egyetemváros

követhetők a felharmonikusok. A kísérleti méréseknél a legnagyobb amplitúdót 250 Hz-nél tapasztaltuk. Nagysága esetenként meghaladta az 50 Hz-es jel egytizedét.

A numerikus szimulációban a vezetékeket a felszín fölötti végtelen hosszúságú áramszálnak vettük és vizsgáltuk mind a szimmetrikus, mind az aszimmetrikus terhelés esetét. Szimmetrikus terhelésnél a távvezeték környezetében térerősség csak azért mérhető, mert a vezetékek távolsága a mérési ponttól eltérő. Az aszimmetrikus távvezeték lényegesen nagyobb térerősséget hoz létre. Ilyenkor jó közelítéssel a nullavezeték tekinthető a tér forrásának. Bebizonyosodott, hogy egy, a féltér fajlagos ellenállásától és a frekvenciától függő távolságon túl mindkét esetben síkhullámnak tekinthető elektromágneses tér alakul ki.

A végtelen hosszú vezeték terét már a korai szakirodalom is bőségesen tárgyalta. A horizontálisan rétegzett esetre például BURSIA [1936] és WAIT [1982] könyvei említethetők. Tájékoztató vizsgálatokhoz megfelelő eredményt ad a komplex-tükörpontos közelítés is [BOTELER, PIJOLA 1998]. A primer térnek a vezetékekkel párhuzamos elektromos (E_y), valamint rá merőleges vízszintes (H_x) és függőleges (H_z) mágneses térerősség-komponense van. A komplex-tükörpontos közelítés szerint

$$E_y = \frac{j\omega\mu_0 I}{2\pi} \ln \left[\frac{\sqrt{(h+2p)^2 + x^2}}{\sqrt{h^2 + x^2}} \right]$$

$$H_x = \frac{I}{2\pi} \left(\frac{h}{h^2 + x^2} + \frac{h+2p}{(h+2p)^2 + x^2} \right),$$

$$H_z = \frac{I}{2\pi} \left(\frac{x}{h^2 + x^2} - \frac{x}{(h+2p)^2 + x^2} \right)$$

ahol x a vezeték távolsága, h a magassága, I az áramerősség, ω a körfrekvencia, p a komplex szkin-mélység, amely

$$p = \frac{Z}{j\omega\mu_0},$$

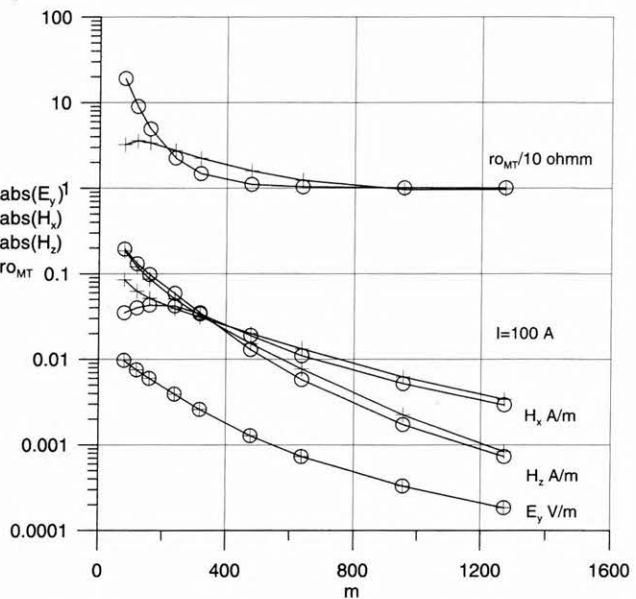
ahol μ_0 a vákuum permeabilitása, Z a homogén, illetve a horizontálisan rétegzett féltér bemeneti impedanciája (a komplex szkin-mélység valós részét p_v -vel jelöljük).

A komplex-tükörpontos közelítés mértékének illusztrálására az 1. ábrán bemutatjuk a 10 ohmm-es féltér fölött 15 m magasságban levő végtelen vezeték térerősség-komponenseinek alakulását a közelítő és a pontos képlettel számolva. A körrel jelzett vonalak mutatják a komplex-tükörpontos közelítés eredményét. Szerepel az ábrán az E_y/H_x impedancia abszolút értékéből a magnetotellurika képletével számított fajlagos ellenállás is, ami a CSAMT módszer esetéhez hasonlóan a távoli zónából a vezetékekhez közeledve dinamikusan növekszik.

2-D-s inhomogenitások esetét integrálegyenletes megoldással HOHMANN [1971] vizsgálta. Az általunk használt 3-D-s integrálegyenletes program ZHDANOV, PORTNAGUINE, HURSÁN [2002] tanulmánya alapján készült.

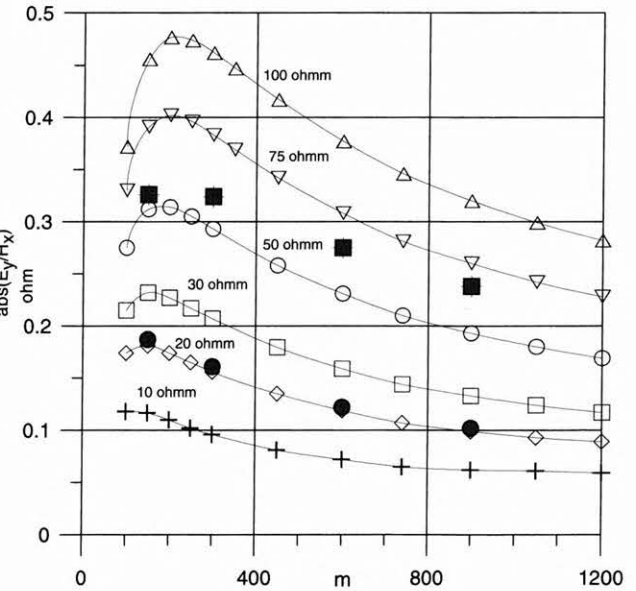
A földtani információk az egyes térerősség-komponensekben a vezetékek elrendeződésétől, a vezetékek közötti árameloszlástól, a vezetéktől mért távolságtól függően jelennek meg. A távvezeték közvetlen közelében az egyes vezetékszálak terének szuperpozíciója jelentősen módosíthatja a földtani információ megjelenését az egyetlen vezetékszál esetéhez képest. A 2. ábra különböző fajla-

gos ellenállású féltérrel fölött a bemeneti impedancia (E_y/H_x) távolságfüggését mutatja egyetlen vezetékszálra, a 3. ábra pedig három — egy síkban, egymástól 2–2 m-re levő — 120–120 fok fáziseltolású vezetékszálra. Valamennyi vezeték 15 m magasságban van.



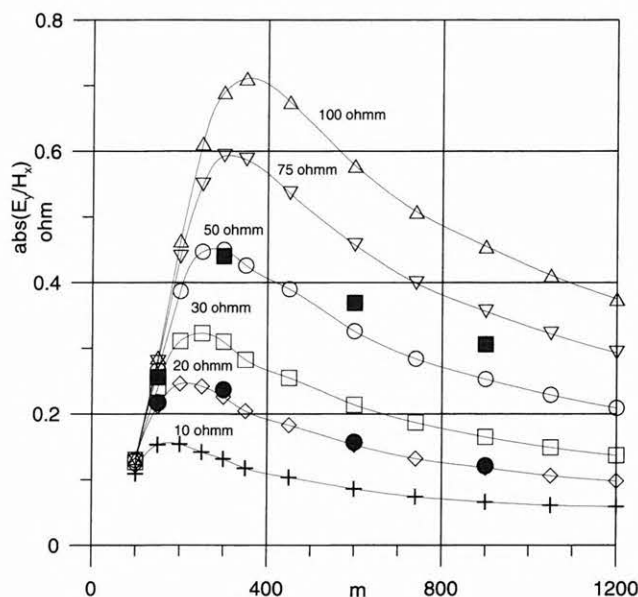
1. ábra. Egy 15 m magasan levő áramszál térerősség-komponensei 50 Hz-en a szigorú (kereszt) és közelítő (kör) képlettel számolva

Fig. 1. EM field components due to a line-source at a height of 15 m, carrying a 50 Hz current. Crosses: exact formulas; circles: complex image formulas



2. ábra. A bemeneti impedancia távolságfüggése 50 Hz-en változó fajlagos ellenállású homogén és kétréteges ($\rho_1=100$ ohmm, $h_1=10$ m, $\rho_2=20$ ohmm körrel; $\rho_1=20$ ohmm, $h_1=20$ m, $\rho_2=100$ ohmm négyzettel jelölve) féltérrel fölött egyetlen vezeték esetén

Fig. 2. Input impedance as a function of distance and resistivity of the homogeneous half-space and two-layer half-space (circles: $\rho_1=100$ ohmm, $h_1=10$ m, $\rho_2=20$ ohmm; squares: $\rho_1=20$ ohmm, $h_1=20$ m, $\rho_2=100$ ohmm) due to a line source, carrying a 50 Hz current



3. ábra. A bemeneti impedancia távolságfüggése 50 Hz-en változó fajlagos ellenállású féltér fölött három, egy síkban levő és 120°-os fáziseltolású vezeték esetén. A jelölések a 2. ábra szerintiek

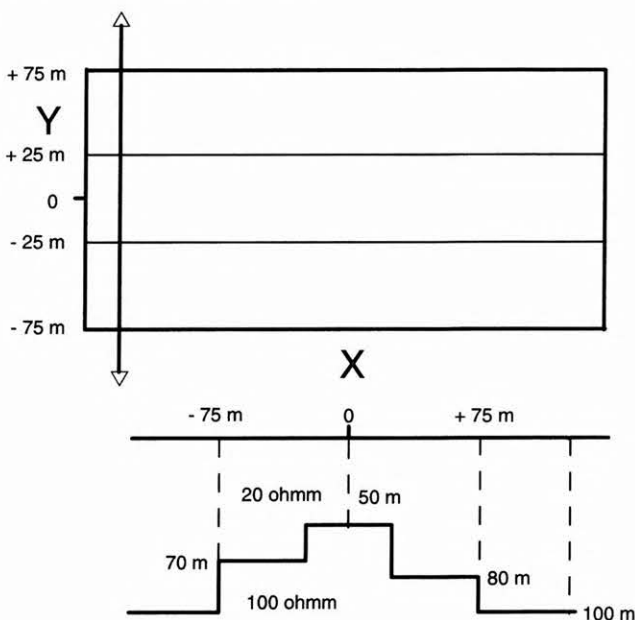
Fig. 3. Input impedance as a function of distance and resistivity of the homogeneous and two-layer half-space due to three line sources at the same height, carrying 50 Hz currents with 120° phase shift, and of the same intensity. Symbols are the same as in Fig. 2

Egyetlen áramszál esetén a bemeneti impedancia még a vezeték közvetlen közelében is jól indikálja a féltér fajlagos ellenállásának változását. Az impedancia amplitúdó távolságfüggésében a fajlagos ellenállástól függően maximum alakul ki, mely a fajlagos ellenállás növekedésével egyre nagyobb távolságnál jelentkezik. A vizsgált fajlagos ellenállás tartományban ez a maximum a szkin-mélység (p_v) függvényében a $0,3p_v < x < 0,6p_v$ intervallumban van és ezután csökkenő trendű változás tapasztalható. Ezen a szakaszon a MT látszólagos fajlagos ellenállás képletét alkalmazva a bemeneti impedanciából a féltér tényleges fajlagos ellenállását többszörösen meghaladó értékű látszólagos fajlagos ellenállások adódnak úgy, mint a CSAMT mérésnél. A látszólagos fajlagos ellenállás ezután fokozatosan közelít a tényleges értékhez, ami kis fajlagos ellenállás mellett kisebb távolságon áll elő. A Cagniard-formula alkalmazásával pl. a 100 ohmm-es féltér fölött 1200 m-en a látszólagos fajlagos ellenállás még mintegy 3,5-szerese a valódinak, ugyanakkor a 10 ohmm-es féltér fölött mintegy 900 m után már elfogadható értékek adódnak. Homogén féltér felett egyetlen áramszál esetén a távvezetékstől mintegy 4–5 szkin-mélységen túl a Cagniard-féle fajlagos ellenállás formula jó közelítés.

Három vezetékstől mellett (3. ábra) a távvezeték közvetlen közelében rohamosan csökken a bemeneti impedancia és a felbontás mértéke is. Az egyetlen áramszál esetéhez képest a maximum helye a nagyobb távolságok felé tolódik el — itt a maximum a $0,5p_v < x < 0,85p_v$ intervallumban jelentkezik — és az impedancia nagyobb értékű, mint egy vezetéknel. Növekvő távolságnál azonban a féltér fajlagos ellenállásától függően az impedanciagörbék közelítenek a 2. ábra megfelelő görbéihez.

A 10 ohmm-es féltér fölött már 1200 m-nél előáll ez a helyzet. A 100 ohmm-es féltér fölött viszont ugyanott mintegy 1,3 az impedanciák aránya. A távvezetékstől távolodva kialakul tehát az a helyzet, amikor a több elemi vezeték tere is egy áramszáltól származónak, sőt síkhullámú térnek tekinthető. Ilyen elrendezés mellett a távvezeték nyomvonalához képest mintegy 5–6 szkin-mélységnél nagyobb távolságoknál a Cagniard-féle fajlagos ellenállás formula alkalmazható. Ugyanakkor az is megállapítható, hogy az ennél kisebb távolságoknál — az átmeneti zónában — is hasonló értékű földtani információk találhatók.

Rétegzett féltér fölött a bemeneti impedancia nagysága az 50 Hz-nél érvényesülő effektív fajlagos ellenállás szerint alakul. Példaképpen a 2–3. ábrán az 50 és 75 ohmm-es görbe közötti pontok (tömött négyzettel jelölve) a 20 ohmm, 20 m–100 ohmm, míg a 20 ohmm-es görbe mentén kialakuló pontok (tömött körökkel jelölve) pedig a 100 ohmm, 10 m–20 ohmm kétréteges metszet fölötti bemeneti impedanciák. Utóbbi esetben az 50 Hz szkin-mélységének, valamint a 100 ohmm-es felszíni réteg kis vastagságának aránya miatt az impedanciát alig befolyásolja ez a felszíni réteg.

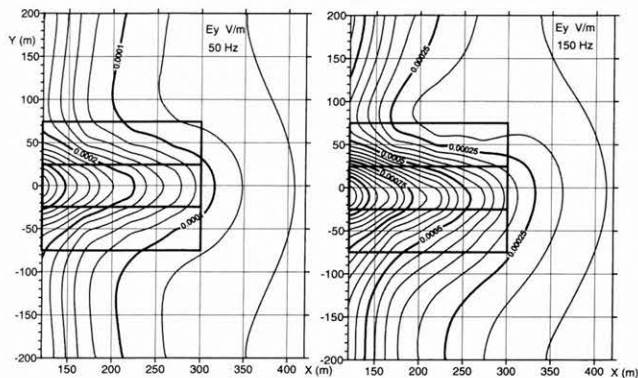


4. ábra. A numerikus szimuláció 3-D-s modellje

Fig. 4. Plan view and cross section of the applied 3-D model in the numerical model calculation

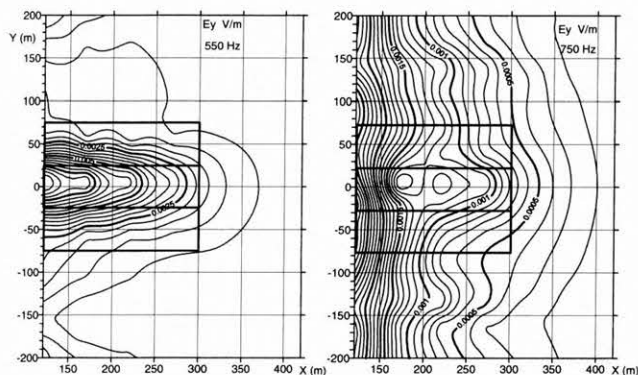
A kutatási mélység és a laterális felbontóképesség részletesebb vizsgálatára egy 3-D-s nagy fajlagos ellenállású lépcsőzetes aljzatfelboltozódás modelljét vettük fel. Felülnézete és Y irányú metszete a 4. ábrán látható. A modell megválasztásánál a terepi kísérletekre kiválasztott terület földtani felépítésére voltunk tekintettel. A 20 ohmm-es fedő alatt a 100 ohmm-es aljzatnak a vezetékre közel merőleges csapású, 150 m széles és 300 m hosszúságú lépcsős felboltozódása van. A lépcsők mérete a két szárnyon eltérő. A levetett részek felszíni számított mélysége 70 és 80 m. A boltozat hosszanti tengelyre merőleges lehatárolás vertikális síkokkal történik, az Y irányú távvezetékkel párhuzamosan. Az aljzat fel-

boltozódását 10x10x10 m-es kockákból építettük fel. A három fázisvezeték 15 m magasságban egymástól 2–2 m-re egy síkban vettük fel 100–100 A áramerősséggel. A középső fázisvezeték az $x = 20$ m tengely mentén húzódik. A távvezetékkel párhuzamos elektromos térerősség alakulása néhány frekvenciára az 5–6. ábrán szerepel. A mérési szelvények $x = 100$ m-től kezdődően 50 m-ként követik egymást a legnagyobb távolság mellett a legnagyobb frekvencián megközelítve a távoli zónát.



5. ábra. A távvezetékkel párhuzamos elektromos térerősség izovonalai a 4. ábra modellje fölött 50 és 150 Hz-en

Fig. 5. Contour map of the magnitude of the 550 Hz and 750 Hz electric field component, parallel to the power-line, over the model shown in Fig. 4

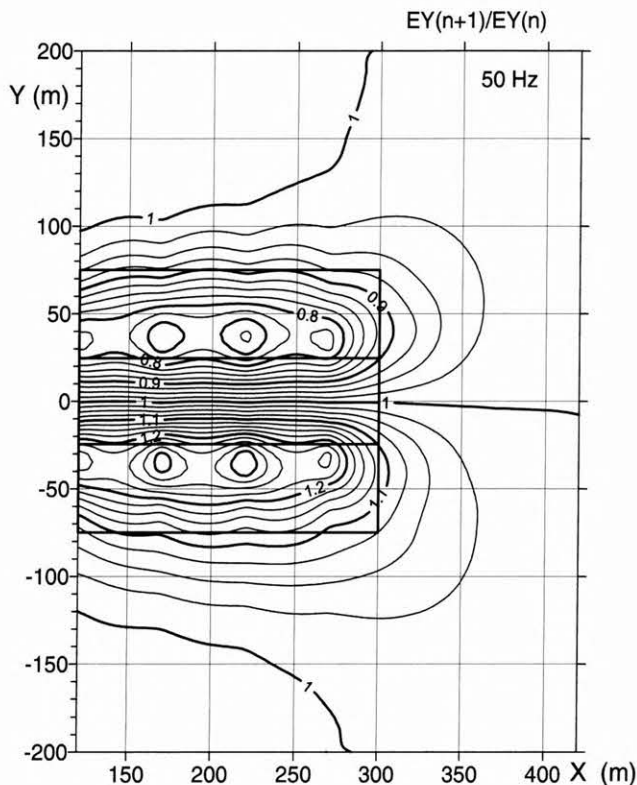


6. ábra. A távvezetékkel párhuzamos elektromos térerősség izovonalai a 4. ábra modellje fölött 550 és 750 Hz-en

Fig. 6. Contour map of the magnitude of the 550 Hz and 750 Hz electric field component, parallel to the power-line, over the model shown in Fig. 4

50 Hz-nél a behatolási mélység jóval meghaladja az aljzat mélységét. Emiatt az izovonalak aszimmetriája kisebb mértékű. 150 Hz-nél viszont a bal oldali alsó lépcső jobb oldalához képest magasabb helyzete — 4. ábra, oldalnézeti kép — miatt már jelentős aszimmetria alakul ki. 550 Hz-nél az izovonalak lefutására már inkább a felboltozódás tetejének van hatása. Emiatt az anomáliák aszimmetriája csökken és területe szűkül. 750 Hz-nél azután már alig jelenik meg a felboltozódás indikációja. Megállapítható tehát, hogy a villamos távvezeték terének használatával jelentős kutatási mélység és jó laterális felbontás érhető el.

A térerősség a távvezetékkel távolodva dinamikusan csökken. Az anomália relatív értéke azonban kevésbé függ a távolságtól. Ezt mutatja a 7. ábra, amelyen az egyes szelvényeken a szomszédos terítéseken (MN=20 m) mért feszültségek hányadosa — a mindenkori felső állomáshoz tartozó érték van az alsóra normálva — szerepel. A laterális változások keresésében követhető tehát ez a vezeték áramerősségétől függetlenített és csak az elektromos térerősséget használó, a szomszédos elektróda-terítések feszültségarányát mérő méréstechnika.



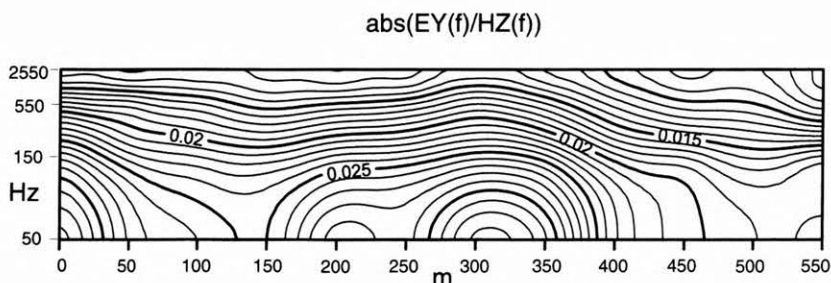
7. ábra. A távvezetékkel párhuzamos szelvényeken ($X=170, 220$ és 270 m) a szomszédos elektróda-terítéseken mért feszültségek hányadosának izovonalas térképe 50 Hz-en a 4. ábra modellje fölött

Fig. 7. Contour map of the ratio of magnitudes of electric field components at 50 Hz, measured at neighbouring sites along profiles, parallel to the power-line ($X=170, 220$ and 270 m), over the model shown in Fig. 4.

Vizsgálataink szerint a horizontális, valamint a vertikális mágneses térerősségre normált elektromos térerősségek — impedanciák — izovonalképe lényegében megtartja az 5–6. ábrán bemutatott sajátosságokat. A mágneses térerősség-komponensek ugyanis lényegesen kisebb mértékben függnek a laterális inhomogenitásoktól, mint az elektromos térerősség.

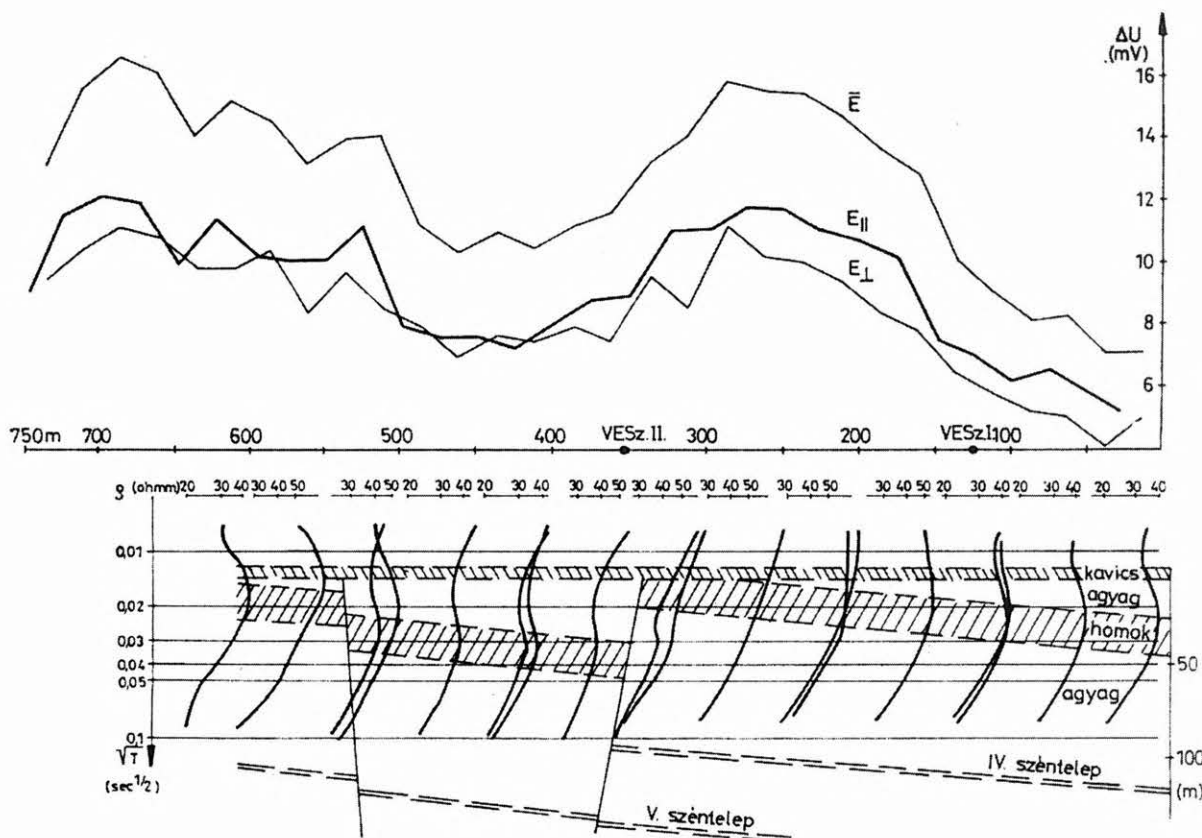
3. A terepi kísérleti mérések eredményei

Az 50 Hz-es mérések szerepét a mélyszondázások eredményeinek extra-, vagy interpolálásában és mérési hálózatuk telepítésének előkészítésekor a laterális változások előzetes felderítésében látjuk. Ilyen céllal végeztük kísérleti méréseinket is.



11. ábra. Impedancia (E/H_2) – frekvencia metszet a Sajókaza 2 szelvényen

Fig. 11. Impedance (E/H_2) amplitude-frequency cross-section along the profile of "Sajókaza 2"



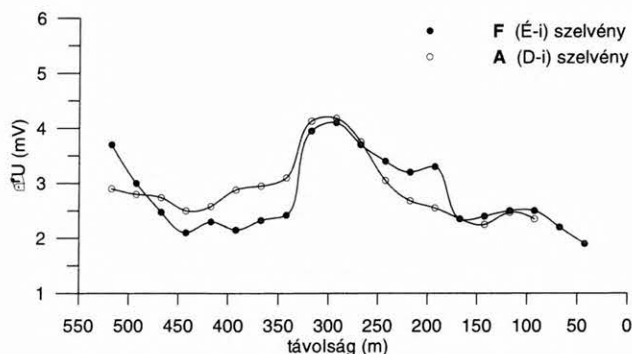
12. ábra. Az 1981. évi Múcsony környéki 50 Hz-es és FRSZ mérési eredmények és értelmezésük

Fig. 12. Results of the 50 Hz electric field ratio and frequency sounding measurements (lower curves) carried out in 1981 at Múcsony, together with their geological interpretation

A távvezeték 150 m-re levő másik (8. ábra, 2.) szelvényen az impedancia használhatóságának és a felharmonikusok mérhetőségének lehetőségét kívántuk megvizsgálni. Az indikáló egység továbbra is a tranzisztoros mV-mérő, aminek bemenetéhez egy Krohn-Hite sávszűrőt csatlakoztattunk. A mágneses térerősség indikátora egy régi Slingram műszer 0,75 m átmérőjű vevőtekercse volt. Megfelelő tekercstartó hiányában a könnyebb kezelhetőség miatt vízszintes síkú tekercssel a vertikális mágneses összetevőt használtuk a normálásra. 20 Hz-es sáv szélességgel a 150, 250, 350, 550, 950, 1550 és 2550 Hz-es felharmonikusokat mértük. Az impedancia értéke az elektromos térerősség frekvenciafüggése miatt — l. a komplex tükrönpontos közelítés képletét — a frekvenciával dinamikusan növekszik. Ennek eltüntetésére homogén feltételre kiszámítottuk a távvezeték hat fázisvezetékének elrendezéséhez

tartozó elméleti karakterisztikát. Az 50 Hz-es impedanciához képest előálló növekedés mértékével korrigáltuk azután a felharmonikusoknál mért impedanciát. Az eredmény a 11. ábrán látható. A szelvény nullapontja hozzávetőleg a 9. ábra 27-28. pontjának megfelelő szerkezeti helyzetben van. Az izovonalak jól mutatják a gerinc tagoltságát és a 400 m után kezdődő elmélyülést. Az impedancia laterális változása a frekvenciával egyre csökken utalva arra, hogy a változást okozó inhomogenitás a kis frekvenciák behatolási mélységtartományában van. A kísérleti mérés eredménye alapján indokolt a frekvenciaszondázás lehetőségének további kutatása.

3.2. A kísérleti mérések másik helye Múcsony környéke, a Borsodi Szénbányák Vállalat egykori Szeles-akna bányamezejének területe. Az 1981. évi CSAMT és 50 Hz-es méréseink itt egy keskeny árkot harántoltak (12. ábra).



13. ábra. 50 Hz-es feszültség-arány szelvények az 1981-es mérések helyének megkeresésére

Fig. 13. EM 50 Hz electric field ratio measurements at Múcsony, intended to locate the EM profiles from the year 1981

Módszerfejlesztési céllal ezen a helyen újabb méréseket kívántunk végezni. A hajdani legelőt azonban felszántották és a geodéziai pontokat eltüntették. Emiatt két — a 14. ábra F és A szelvényén áthaladó — szelvényen a szomszédos elektródaterítések feszültségarányát mérve 50 Hz-en kerestük meg a határoló vetők helyét (13. ábra). A 300–350 m-nél levő vető csapását ezután hat, egymástól 20–20 m-re levő rövid szelvénnel pontosítottuk (14. ábra). A vető felső D-i oldalán az izovonalak egy blokkos kiemelkedésre utalnak, ami Ny-felé is lehatárolható. Ezen a területen a mérési hely közelében csak kisebb teljesítményű távvezetékek találhatók. Ennek ellenére 1981-ben és 2005-ben is olyan stabil, állandó szintű feszültségek voltak mérhetők, hogy lényegében az arány-mérésre se volt szükség. Feltételezhető, hogy a télerősség forrása a helyi távvezetékek mellett a közeli Borsodi Hőerőmű és a kazincbarcikai Borsodchem gyártelepének villamos hálózata.

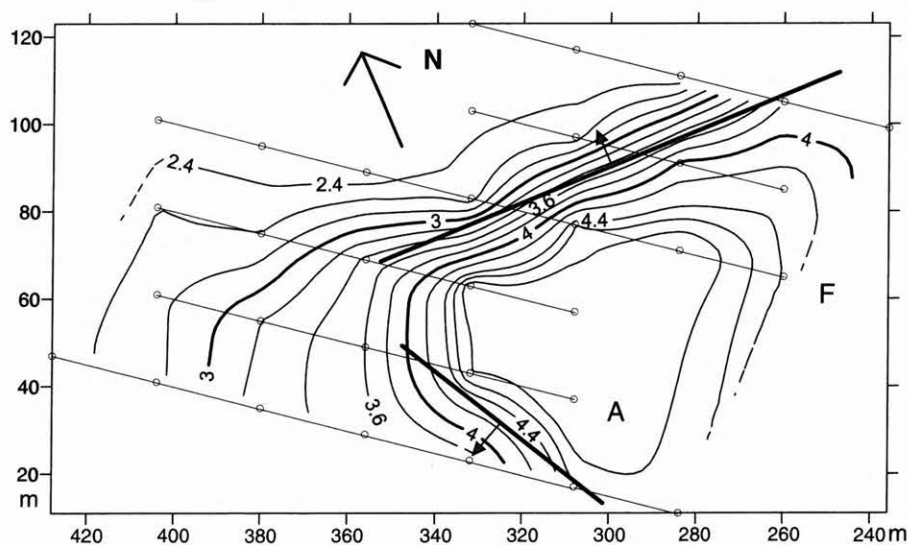
Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket fejezzük ki az Országos Kutatási Alapnak munkánk támogatásáért (OTKA témaszám: T049479), valamint KULCSÁR László műszaki ügyintézőnek, KAVANDA

Rékának és SZABÓ Istvánnak, a Mikoviny Sámuel Doktori Iskola hallgatóinak a terepi mérésekben nyújtott segítségért. Megköszönjük továbbá ADÁM Antal és SZARKA László lektorok értékes és figyelembevett észrevételeit, tanácsait.

HIVATKOZÁSOK

- BOTELER D. H., PIRJOLA R. J. 1998: The complex image method for calculating the magnetic and electric fields produced at the surface of the Earth by the auroral electrojet. *Geophysical Journal International* **132**, 31–40
- BURSIAI V. P. 1936: Teoria elektromagnitnüh polej primenyaemüh v elektrorazvedke. Nyedra, Moszkva
- GYULAI Á. 2000: 2-D földtani szerkezetek interpretációja együttes geoelektromos inverziós módszerrel. MTA doktori értekezés
- HOHMANN G. W. 1971: Electromagnetic scattering by conductors in the earth near a line source of current. *Geophysics* **36**, 101–131
- LABSON V. F. 1990: Airborne electromagnetic mapping using powerline fields. *U.S. Geological Survey Bull.* 192S, 189–192
- LABSON V. F., MEDBERRY H. G. 1989: Airborne resistivity mapping using powerline sources. *Expanded Abstracts*, 59th Ann. Internat. Mtg. SEG, 138–140
- MCCOLLOR D. C., WATANABE T., SLAWSON W. F., SHIER R. M. 1983: An EM method for earth resistivity measurements using powerline harmonic fields. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity* **35**, 221–244
- RISK G. F., CALDWELL T. G., BIBBY H. M. 1999: Use of magnetotelluric signals from 50 Hz power lines for resistivity mapping of geothermal fields in New Zealand. *Geophysical Prospecting* **47**, 1091–1104
- TAKÁCS E. 1979: Vizsgálatok 50 Hz-es távvezetékek elektromágneses terének geofizikai alkalmazására. *Magyar Geofizika* **20**, 5, 192–198
- WAIT J. R. 1982: Geo-electromagnetism. Academic Press
- ZHDANOV M. S., PORTNIAGUINE O., HURSÁN G. 2002: Compression in 3-D integral equation modelling. Three-dimensional electromagnetic, Elsevier



14. ábra. 50 Hz-es feszültség-arány izovonalak vetők csapásának és kiterjedésének megállapítására

Fig. 14. Contour map of 50 Hz electric field ratio measurements to determine the strike direction and the extension of faults