

Telluráramok számítása az EURIGIC programban

**Dr. Ádám Antal, Dr. Kis Árpád, Dr. Lemperger István, Dr. Novák Attila,
Dr. Prácser Ernő, Dr. Szarka László, Dr. Wesztergom Viktor**
MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Geodéziai és Geofizikai Intézet,
Sopron

Bevezetés

A Carrington-eseményként ismert rendkívüli napkitörést, az 1859. szeptember 1-jén bekövetkezett flert követően a geomágnesség történetének legnagyobb mágneses viharával és a közepes geomágneses szélességeket is betöltő sarki fénnel egyidejűleg az akkorra már elég kiterjedt távíróhálózatban súlyos működési zavarok léptek fel. A technika történetének talán legnagyobb hatású napfizikai eredetű „balesete” 1989. március 13–14-én történt, amikor is egy geomágneses vihar során a kanadai Montrealban a Hydro Quebec erőmű meghibásodása következtében 9 óras teljes áramkimaradás volt, ami legalább 6 millió embert érintett. Svédországban ugyanakkor hat különböző 130 kV-os rendszerben lépett fel jelentős feszültségesés. Az előző napciklus maximumára (2003) esett az ún. Halloween-esemény, amikor Skandinávia egy része borult sötétségbe.

Annak hátterében, hogy egy-egy nagyobb napvihar és az azt követő geomágneses aktivitás egyfajta kockázati tényezővé is vált, a geomágneses indukció jelensége áll. Az időben változó geomágneses térhez az indukció törvénye alapján elektromos tér kapcsolódik. A véges vezetőképességű altalajban Ohm törvényének megfelelően az elektromos tér hatására földi áramok vagy más néven tellurikus áramok alakulnak ki. Ezek az indukált áramok kis elektromos ellenállású, információ- vagy energia-átviteli távvezetékekbe, csővezetékekbe azok földelési pontjain keresztül jutnak be. A geomágneses viharok persze nemcsak a vezetékes rendszerekre jelentenek kockázatot, hanem a vezetékek nélküli távközlésre, navigációs rendszerekre és más műholdas technológiákra is. A katasztrofális következményekkel járó eseményeket követően világszerte megnőtt az igény a geomágneses viharokkal szembeni kiszolgáltatottság mérsékelésére. Az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpontban 2011-ben az európai kritikus infrastruktúra védelmét szolgáló EURISGIC (*EUropean RISk on Geomagnetically Induced Currents*) program keretében elkezdődött az európai litoszféralemez indukciós modelljének megalkotása és az obszervatóriumi tellurikus adatok átfogó elemzése.

A geomágneses tér (ULF tartomány) primer forrásainak vizsgálata

Az ULF tartományba eső felszíni mágneses térváltozások elsődleges forrásai az ionoszférában kialakuló áramrendszerek. Általános ionoszférikus forrás áramterekre meghatároztuk a felszíni indukáló és indukált tér, valamint az indukáló és a tellurikus tér viszonyát a forrás geometriai sajátosságait leíró paraméterek függvényében. A legfontosabb geometriai jellegű forrás paraméterek a következők: a kiterjedés (azimutális és meridionális), valamint az áram iránya és az áramtér horizontális változását meghatározó ún. forrás hullámhossz. Fizikailag realizált forrás paraméter tartományokban numerikus számításokkal meghatároztuk, hogy a felszíni mágneses és tellurikus változások viszonya hogyan változik rögzített felszín alatti fajlagos elektromos ellenállás-eloszlás mellett. A vizsgálat során a nagycentri obszervatórium környezetében érvényes, korábbi publikációkból ismert [1] közegmodellt használtuk fel. A bemeneti EM impedanciát, mint a felszíni mágneses és tellurikus variációk viszonyát, a forrás paraméterek függvényében megjelenítve a következő megállapításokat tehetjük:

- Nagy forráshullámhossz esetén – ez a kvázi-síkhullám feltevésnek felel meg – a felszíni mágneses és tellurikus változások amplitúdójának viszonya a forrás kiterjedésétől gyakorlatilag független, míg fáziskülönbségük szempontjából a forrás mérete meghatározó.
- A forrás hullámhosszánaak csökkenésével (Λ növekedésével) mind az amplitúdók viszonya, mind a felszíni mágneses és elektromos terek változásának fáziskülönbsége monoton csökken.
- Megállapítható továbbá, hogy kis forráshullámhosszak (nagy Λ) esetén a forrás kiterjedése a térváltozások amplitúdójának arányát erősen befolyásolja.

A felszíni kvázi-szinuszos EM variációk ULF tartománybeli összetevőit eredményező ionoszférikus áramrendszerek magnetoszférikus folyamatok révén alakulnak ki. E magneto-hidrodinamikai jelenségek a magnetoszféra és a napszél energiacsatolásának eredményeként írhatók le, melyek a geomágneses erővonalak révén az ionoszférára vetülnek. A Pc1-2 típusú pulzációk (periódus 1–15 s) mágneses erővonalak mentén terjedő – nem álló – MHD hullámok, ebben alapvetően különböznek hosszabb periódusú társaiktól. A Pc3 típusú pulzációkon belül megkülönböztetünk kompressziós és transzverzális eredetűeket. A kompressziós Pc3 hullám (15–45 s) az ún. *upstream* térségben lejátszódó hullám–részecske kölcsönhatás eredménye. A transzverzálisak keletkezésére kézenfekvő magyarázat az erővonal-rezonancia, ám gyakran mutatnak upstream sajátosságokat. Emiatt valószínűsíthető, hogy a két pulzációs módus esetenként ugyanannak az energiának két különböző úton való becsatolódása [11, 4].

A tipikus Pc4 pulzáció (45–150 s) radiális irányban polarizált (poloidális) ULF hullám az egyenlítő szűk környezetében. Eredetüket tekintve valószínűleg 150 keV körüli protonok ún. ide-oda pattogó (*bouncing*) rezonanciája révén keletkeznek. Pc5-ös pulzációk (150–600 s) több különböző mechanizmus révén alakulhatnak ki: a magnetopauzán kialakuló ún. Kelvin–Helmholtz-instabilitás erővonal menti becsatolódásaként, a magnetoszféra mint üregrezonátor sajátrezgéiseiként [7], vagy akár annak hullámvezető tulajdonságai révén [12].

A pulzációk keletkezési mechanizmusairól [9] adott részletes áttekintést. Az említett MHD hullámforrások eredményeként terjedő perturbációk az ionoszférában áramokat keltenek, és kiterjedt áramrendszereket okoznak. Az indukciós vizsgálatok során az említett MHD folyamatok eredményeként kialakult ionoszférikus áramrendszerek mágneses térváltozásainak, illetve az általuk indukált tellurikus áramok tereinek eredőjét regisztráljuk. A primer tér forrásainak geometriájára vonatkozó vizsgálatokat a Széchenyi István Geofizikai Observatórium tellurikus és geomágneses regisztrátumainak felhasználásával végeztük el, különböző geomágneses háborgatottsági viszonyok mellett meghatározott impedancia függvények összehasonlításával. A különböző aktivitással jellemezhető időintervallumokat geomágneses indexek alapján válogattunk szét. A vizsgálat tanúsága szerint a nyugodt, a zavart és az extrém háborgatott időszakok során, obszervatóriumi regisztrátumok alapján meghatározott felszíni impedancia függvények csak kis mértékben térnek el egymástól. Ha feltételezzük, hogy geomágneses értelemben nyugodt időszakokban olyan pulzációs áramterek alakulnak ki az ionoszférában, melyek a felszínen síkhullámként leírható primer mágneses teret hoznak létre, akkor kijelenthetjük, hogy az extrém háborgatott időszakokban jellemző forrás áramrendszerek felszíni terei szintén jól közelíthetőek síkhullámok lineáris kombinációjával [8]. A vizsgálatot négy év hosszúságú regisztrátumok felhasználásával végeztük, a statisztikai eredmények reprezentatívnak tekinthetőek. Az eredmények legfőbb gyakorlati jelentősége abban rejlik, hogy ezáltal bizonyítottnak tekinthetjük, hogy a felszíni geomágneses primer változások közel azonos fázisban zajlanak, akár több száz km-es horizontális kiterjedést tekintve is. Mindemellett tudjuk, hogy a pulzációs források kiterjedése legalább 1000 km-es skálán mérhető. Összességében kijelenthetjük, hogy a geomágneses tér regisztrálása közepes földrajzi szélességen, ULF tartományban, több száz km-es skálán reprezentatívnak tekinthető.

Ez utóbbi megállapítás alapját képezheti egy komplex vizsgálatnak, amely során az elektromos energiát továbbító hálózat csillagpontjainál mérhető áramerősség felhasználásával értékes földtani információhoz jutunk. Az elképzelés lényege, hogy az obszervatóriumban regisztrált mágneses variációkat az adott földelési pontok környezetében is érvényesnek tekintve, abból az elektromos teret, illetve a csillagpontok közötti potenciálkülönbséget származtatni tudjuk. A geomágneses változásokból számított feszültség és a mért áramérték viszonyából pedig a földtani komponensek és szerkezetek által meghatározott elektromos ellenállásra következtethetünk.

Az indukált áramok közelítő számítása

Az ionoszférikus-magnetoszférikus eredetű ULF hullámok terjedésénél azzal a feltéssel élhetünk, hogy a felszínre elérő EM hullámok síkhullámnak tekinthetők. Ez az egyszerűsítés abban az esetben fogadható el, ha a vizsgált térrész elég kicsi ahhoz, hogy a földfelszín görbületét elhanyagolhassuk, továbbá a primer források karakterisztikus mérete jóval meghaladja a vizsgált frekvenciatartományban adódó legnagyobb behatolási mélységet, illetőleg az azt jellemző ún. skin-mélységet.

Egy tetszőleges féltér felszínén az elektromos (**E**) és geomágneses (**H**) térerősség vektorok viszonyát a periódusfüggő, komplex impedancia tenzor (**Z**) írja le:

$$E_x T = Z_{xx} T H_x T + Z_{xy} T H_y T \quad (2)$$

$$E_y T = Z_{yx} T H_x T + Z_{yy} T H_y T \quad (3)$$

ahol T a periódusidő, Z_{ij} az impedanciatenzor komplex eleme. Véges vezetőképességű homogén, vagy a felszínnel párhuzamosan rétegzett féltér (1D szerkezet) esetén $Z_{xy} = -Z_{yx}$ és $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$, így:

$$E_x T = Z_{xy} T H_y T \quad (4)$$

$$E_y T = Z_{yx} T H_x T \quad (5)$$

A **Z** impedanciatenzor lényegében a közeg válaszfüggvénye, ami az alábbi összefüggésben van a homogén féltérben értelmezett ρ_a látszólagos fajlagos ellenállással:

$$\rho_{xy} = 0.2T \frac{E_x^2}{H_y} = 0.2T |Z_{xy}|^2 \quad E \text{ [mV/km]}, H \text{ [nT]}, T \text{ [s]} \quad (6)$$

A fázis pedig:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\text{Im} Z_{xy}}{\text{Re} Z_{xy}} \quad (7)$$

2D szerkezetek kutatására jól alkalmazhatók a geomágneses mélyszondázásokból kapott indukciós vektorok. Ilyenkor a feltételezett síkhullám horizontális mágneses komponensei részben a vertikális komponensbe transzformálódnak:

$$H_z T = X_{zx} T H_x T + X_{zy} T H_y T \quad (8)$$

X_{zx} és X_{zy} a periódusidőtől függő komplex mennyiségek, az ún. indukciós vektort pedig a

$$K = X_{zx}, \quad X_{zy} \quad (9)$$

összefüggéssel definiáljuk. Amint ismert, két tetszőleges felszíni pont (A és B) közötti elektromos potenciálkülönbséget az alábbi vonalintegrál adja:

$$U = \int_A^B E_s ds \quad (10)$$

A két végpontjában földelt áramvezetőben (csővezeték, távvezeték, stb.) a potenciálkülönbség hatására áram folyik. Numerikus számítások és hosszú obszervatóriumi tellurikus adatsorok azt mutatják, hogy nyugodt és közepes tevékenység esetén a felszíni elektromos tér nagyságrendje általában 10^{-3} – 10^{-2} V/km körül van. Az 1 V/km-t meghaladó amplitúdó nagy mágneses viharok során a sarki fény régióban gyakori, de közepes geomágneses szélességeken nagyon ritka. Az 50 V/km amplitúdó a sarki fény régióban is szélsőségesen nagy-nak tekinthető. Az elektromos távvezetékek jellemzően több száz km-es hosszával és $1\ \Omega$ körüli impedanciájával számolva a geomágneses indukció révén a vezetékekben folyó indukált áram a több száz amper nagyságrendet is elérheti. Az ULF tartományba ($10^{-4}\ \text{Hz} < f < 10^{-1}\ \text{Hz}$) eső indukált áramokat a villamosenergia-átvitelben alkalmazott 50-60 Hz-hez képest kvázi-egyenáramoknak tekinthetjük. Az indukált áramok a háromfázisú transzformátorok földelési pontjain jutnak a rendszerbe és szaturációhoz vezetnek. A részleges szaturáció miatt irányítástechnikai problémákat okozó felharmonikusok jelennek meg, szélsőséges esetben a transzformátor tönkremegy. A transzformátorok leégése ritka, de súlyos esemény.

A magnetotellurikus 1D közelítés alapján végzett számítás kvalitatív becslést ad a geomágneses viharok által indukált áramok hatásának vizsgálatához, de a megfelelő műszaki védelem kialakításához egy komplex modellre van szükség. Az európai villamosenergia-hálózat magas integráltságú, sok pontban földelt rendszer, ami inkább hasonlít egy sűrű pók-hálóra, mint lineáris áramvezetőre. A geomágneses tér primer forrásainak sokfélesége elengedhetetlenné teszi a primer források tényleges fizikai paramétereinek vizsgálatát. A magnetotellurikus tapasztalatok pedig azt mutatják, hogy az altalaj elektromos paramétereinek horizontális és vertikális tagoltsága a helyi elektromos tereket olyan mértékben megváltoztatja, hogy számításokat csak az egész európai litoszféra lemezre kiterjedő vezetőképesség modellen lehet végezni.

Az európai litoszférolemez geoelektromos modellje (EURHOM)

Az EURHOM lényegében egy olyan kvázi 3D modell, ami különféle méretű cellákból épül fel, a cellákon belül pedig 1D struktúrát feltételez [3]. A magnetotellurika szerint a helyi felszíni E-t a fajlagos elektromos ellenállás mélybeli eloszlása határozza meg. A köze-tek fajlagos elektromos ellenállása igen változó. A fajlagos elektromos ellenállás helyi változásai a potenciálkülönbség számításakor kiátlagolódnak, jelentős áramcsatornázást okoznak viszont a kétdimenziós (2D) felszín alatti elektromos vezetőképesség-inhomogenitások. A legjelentősebb jólvezető 2D vezetőképesség-anomáliák tektonikai zónákhoz kötődnek, de a modell horizontális felbontásának (*grid*) figyelemmel kell lenni a nagyobb hegyvonulatokra, kiterjedt üledékes medencékre, a domborzatra és természetesen a távvezeték-hálózat topológiájára is. A modell eltérő méretű celláit hosszúsági és szélességi körök választják el. Arra vonatkozóan, hogy az egyes cellákon belül milyen mélységtartományt kell alkalmazni, támpontot ad az elektromágneses tér abszorpciójával (behatolási mélységgel) kapcsolatban álló skin-mélység, ami annak a mélységnek felel meg, ahol az amplitúdó a felszíni érték e -ad részére csökken:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho T}{\mu_0 \pi}}, \quad (11)$$

ahol μ_0 a mágneses permeabilitás (közelítőleg $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{Vs/Am}$).

Az 50–200 km mélységtartományban változó litoszféra–asztenoszféra határfelületen a fajlagos ellenállás $1\ \Omega\text{-m}$ -re vagy az alá csökken [2]. Az ULF tartományban ez olyan jelentős abszorpciót jelent, ami a nagyobb mélységben feltételezett elektromos ellenállás-változásokat a modellben érdektelenné teszi. A litoszférán belül legalább az üledéket és a kristályos aljzatot el kell választani, így az egyes cellákat minimum háromréteges, 1D-s szerkezet tölti ki. Az EURHOM vezetőképesség cellái láthatók.

Köszönetnyilvánítás

A kutatások az Európai Közösség FP7-es keretprogram (FP7/2007–2013) 260330 számú projektje (EURISGIC) támogatásával valósultak meg. / The research leading to these results has received funding from the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007–2013) under grant agreement no. 260330.

Ez a tanulmány a TÁMOP-4.2.2.C–11/1/KONV-2012-0015 számú (Föld-rendszer) projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg. / This study was also supported by the TAMOP-4.2.2.C–11/1/KONV-2012-0015 (Earth-system) project sponsored by the EU and European Social Foundation.

Hivatkozások

- [1] Ádám A. (1970): A földi elektromágneses tér szerepe a Föld belső szerkezetének kutatásában. *MTA X. Osztályának Közleményei*, Vol. 4, pp. 385–416
- [2] Ádám A., Wesztergom V. (2001): An attempt to map the depth of the electrical asthenosphere by deep magnetotelluric measurements in the Pannonian Basin (Hungary). *Acta Geologica Hungarica*, Vol. 44, pp. 167–192
- [3] Ádám A., Prácsér E., Wesztergom V. (2012): Estimation of the electric resistivity distribution (EURHOM) in the European lithosphere in the frame of the EURISGIC WP2 project. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, Vol. 47, pp. 377–387
- [4] Anderson B.J. (1994): An Overview of spacecraft observations of 10 s to 600 s period magnetic pulsations in the Earth's magnetosphere. *AGU Monograph*, Vol. 81, pp. 25–43
- [5] Bartels J., Heck N.H., Johnston H.F. (1939): The three-hour-range index measuring geomagnetic activity. *Terrestrial magnetism and atmospheric electricity*, Vol. 44, pp. 411–454
- [6] Cagniard L. (1953): Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, Vol. 18, pp. 605–635
- [7] Kivelson M.G., Southwood D.J. (1986): Coupling of global magnetospheric MHD eigenmodes to field line resonances. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91, pp. 4345–4351
- [8] Lempérger I. (2012): Az elektromágneses impedancia tenzor külső eredetű változásai. PhD dolgozat
- [9] McPherron R.L. (2005): Magnetic pulsations: Their sources and relation to solar wind and geomagnetic activity. *Surveys in Geophysics*, Vol. 26, pp. 545–592
- [10] Tikhonov A.N. (1950): Determination of electrical characteristics of the deep strata of the Earth's crust. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, Vol. 73, pp. 295–297
- [11] Verő J., Zieger B. (1994): Upstream waves and field line resonances – pulsation research at the Nagycenk Observatory during three solar cycles. *AGU Monograph*, Vol. 81, pp. 55–66
- [12] Walker A.D.M. (1998): Excitation of magnetohydrodynamic cavities in the magnetosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 60, pp. 1279–1293