

**ELEKTROMOS IMPEDANCIA TOMOGRÁFIA (EIT) VEGYIPARI
ALKALMAZÁSA**

- Szakirodalmi összefoglaló -

1. Előzmények

A Karotázs Tudományos Műszaki és Kereskedelmi Kft. 2009. óta mérőműszer-családot fejleszt komplex elektromos impedancia mérésére. A műszercsalád első generációs mérőeszközeiből 4 prototípus 2011-ben készült el. A második generációs eszköz fejlesztése jelenleg folyik, a várható befejezésük: 2012.

A mérőeszközök 2 fő elektromos impedancia mérési feladat típus végrehajtására alkalmasak:

1. EIT: Elektromos Impedancia Tomográfia, ami roncsolásmentes, nem invazív képalkotási technika;
2. EIS: Elektromos Impedancia Spektroszkópia, roncsolásmentes spektroszkópai eljárás, ami elsősorban anyagjellemzőkre, anyagjellemzők időbeli változásának vizsgálatát teszi lehetővé.

A továbbiakban az EIT-vel kívánunk foglalkozni részletesen.

Az első generációs eszközök darabonként 8 csatornásak, ami azt jelenti, hogy az impedancia mérés esetében a mérés eredménye (impedancia abszolút értéke és a fázisszög) az 1 csatornán történő árammérésből és a 7 csatornán történő feszültségmérésből számítható. Multiplexálással a mérőeszközök csatornaszáma 64-re növelhető (8 „lap” áll rendelkezésre a multiplexer esetében) tehát minden „lapozás” esetében 1 csatornán történik árammérés és 7 csatornán feszültségmérés történik. A négy prototípusok képesek master-slave (maximum 1 master és 3 slave) üzemben működni. E szerint összesen $4 \times 8 \times 8 = 256$ csatornán mérhetünk impedanciát és készíthetünk tomográfias képet.

Jelenleg „mindössze” a mérőeszközök állnak rendelkezésre, a kutatás-fejlesztés következő lépései: a modellkísérletek, a mérési eredmények kiértékelésének (inverzió) fejlesztése (2D, 3D, mozgókép) és alkalmazásfejlesztések.

2. Általános ismertetés

Jelen fejezet célja annak összefoglalása, hogy az EIT mióta és milyen mértékben van jelen az ipari folyamatok monitorozásában, megismerésében. A rövid összefoglalást az [1], [2] és [3] alapján készítettük.

A tomográfia koncepciójának ötlete egy norvég fizikus, Abel munkásságában merült fel 1826-ban. Majd 100 évvel később, 1917-ben egy osztrák matematikus, Radon továbbdolgozta Abel ötletét. A CT (computerized tomography) az 1970-es évek szellemi terméke. A tomográfiának számos módszere van, például Röntgen-sugár, gamma-sugár, pozitron emissziós tomográfia (PET), optikai, infravörös stb. [1]

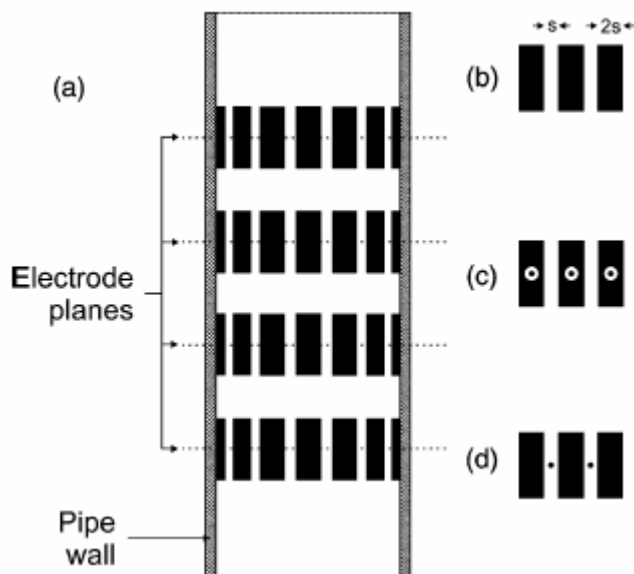
Az EIT a tomográfia egyik ága, amely relative gyors (maximum kb. 200 kép/s, [1]), egyszerűen alkalmazható képalkotási eljárást tesz lehetővé. Alkalmazható kvalitatív eljárásként, különösen többfázisú, áramló rendszerek esetében. Segítségével az áramló rendszer színes áramképét rajzolhatjuk ki.

Az EIT eljárás az ipari folyamat monitoring tevékenységek (industrial process tomography) közül a következők végrehajtására lehet alkalmas (a szakirodalmakban ([1], [2], [3]) ezekre találtunk példát:

1. Szilárd-folyadék fázisú rendszerek áramlástanai vizsgálata:
 - hidraulikus szállítás és többfázisú rendszerek áramlásmérése
 - transzportvizsgálatok (hozam, térfogatáram) hidraulikus, vagy pneumatikus rendszerekben: térfogatarány és sebesség profilok mérése
 - szuszpenziók vizsgálata
2. Keverés:
 - szilárd-folyadék (négy síkban, síkonként 16 elektródás mérés)
 - gáz-folyadék keverés vizsgálata (UMIST, nyolc síkban, síkonként 16 elektródás mérés)
 - különböző viszkozitású folyadékok keverése (UMIST, nyolc síkban, síkonként 16 elektródás mérés)
3. Szeparálás (szétválasztás):
 - Ciklonok üzemvitele: szilárd-szilárd, szilárd-folyadék, folyadék-folyadék (UMIST, nyolc síkban, síkonként 16 elektródás mérés)
 - Habzás vizsgálata
 - Szűrési eljárások
4. Reaktorok vizsgálata:
 - Polimerizáció vizsgálata
 - Fluidágyas reaktorok
 - Nagynyomású reaktorok „tranziens” áramlásának vizsgálata

3. A mérési eredmények kiértékelése

A mérések helyes végrehajtásának egyik sarkalatos pontja az elektródakonfiguráció kialakítása. A tipikus EIT elrendezés: 16 elektróda pl. csőfalon elhelyezve egyvonalban és síkban, egymástól egyforma távolságra (2D-s alkalmazás). Amennyiben több síkban helyezük el az elektródákat 3D-s képet kaphatunk a mérési eredményekről. Egy tipikus elrendezést mutat a következő ábra:



EIT tipikus elektróda elrendezése [2]

A mérések során mind a gerjesztő, mind pedig a mérő elektródák átkapcsolásra (multiplexálásra) kerülnek, tehát minden impedancia mérés elvégzése után ezen elektródák helye, pontosabban címe megváltozik (tovább tolódik) egészen addig, amíg a kezdő pozíciót el nem éri. [2] Természetesen a szakirodalomban különféle elektróda konfigurációkkal találkozhatunk, amik más és más problémák megoldására alkalmasak.

A mérési eredmények kiértékelése bonyolult matematikai modellek alapján készített számítógépes algoritmusok segítségével történik minden esetben. A kiértékelés kapcsán két problémát fogalmazhatunk meg:

1. Direkt probléma: a gerjesztés és a vizsgált anyag ismeretében meghatározzuk a kialakuló potenciáltér paramétereit;
2. Inverz probléma: a gerjesztés és a kialakuló potenciáltér ismeretében meghatározhatjuk az anyagszerkezetet.

Eddigi szakirodalom-kutatásaink során a [4], [5], [6], [7], [8], [9] számú szócikkekben tájékozódunk a kiértékelési módszerek mikéntjéről, de ezen kívül az [1], [2] és [3] is említés szintjén kitér ezekre. A mérési feladatok során az inverz probléma megoldása a célunk ezért a továbbiakban erre térünk ki nagy vonalakban.

Kvázi stacionárius EIT modellezések kiértékeléséhez a „komplett elektróda modell” (CEM, complete electrode model) a választható legjobb rendelkezésre álló megoldás ([9]). A modellt a következő képletek alkotják: ([9])

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\sigma \nabla u) &= 0 & \bar{r} \in \Omega \\ u + z^{(\ell)} \sigma \frac{\partial u}{\partial \bar{n}} &= U^{(\ell)} & \bar{r} \in e^{(\ell)}, \ell = 1, 2, 3, \dots, L \\ \sigma \frac{\partial u}{\partial \bar{n}} &= 0 & \bar{r} \in \partial \Omega / \Gamma_{\Omega, e} \end{aligned}$$

$$\int_{e^{(\ell)}} \sigma \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} dS = I^{(\ell)} \quad \bar{\mathbf{r}} \in e^{(\ell)}, \ell = 1, 2, 3, \dots, L$$

ahol

$\sigma = \sigma(\bar{\mathbf{r}})$, a vezetőképesség eloszlás;

$u = u(\bar{\mathbf{r}})$, az amplitúdó (váltakozó feszültség esetében) a céltartományban (Ω);

L az elektródák száma;

$U^{(\ell)}$ a feszültség a megfelelő, ℓ -edik ($e^{(\ell)}$) elektródán (mérve)

$I^{(\ell)}$ az áram a megfelelő, ℓ -edik ($e^{(\ell)}$) elektródán

$z^{(\ell)}$ a kontakt impedancia a megfelelő, ℓ -edik ($e^{(\ell)}$) elektródán

Továbbá $\Gamma_{\Omega, e} = \bigcup_{\ell=1}^L e^{(\ell)}$ a céltartományt körülvevő elektródák uniója. A mérési hibával (zajjal) figyelembe vett mérési eredmények (U), a vezetőképesség (σ) és az áramerősség (I) közötti kapcsolat

$$U = \bar{R}(\sigma) \cdot I. [9]$$

A szakirodalomban és a CEM modell megoldásai során „additív mérési zaj modellt” alkalmaznak (additive measurement noise model), ami a mérési hibán (e) a következőképpen veszi figyelembe:

$$V = \bar{R}(\sigma) \cdot I + e. [9]$$

A CEM numerikus megoldásához például a végeelem módszert alkalmazzák. [9] A további részletes leírást a [9] tartalmazza.

A matematikai modellek megoldásának célja az EIT esetében a képalkotás. A mérések érzékenysége a 3 D-s tartományon (névleges érzékelési zóna) belül változik és adott esetben az érzékenység ezen a zónán belül a fizikai paraméter térbeli változásától is függ. Ez a nem lineáris környezet teszi az EIT képalkotást bonyolult problémává. [2] A problémamegoldáshoz különböző matematikai módszerek állnak a rendelkezésre: [2]

1. lineáris módszerek: (gyors módszer, ahol a mérési eredmények egy előre meghatározott mátrix segítségével számíthatók)
 - LBP: linear back projection („lineáris visszavetítés”)
2. nem lineáris módszerek:
 - numerikus megoldásokat alkalmaznak
 - a számított eredményeket folyamatosan frissítik, korrigálják nem lineáris iteratív technikákkal (mint pl. a Newton Raphson módszer)
 - e miatt a jelentős számítási megterhelés lassúvá teszi a módszert
 - a lassúság miatt a módszer nem alkalmas on-line monitoring tevékenység végrehajtására, ezért a fejlesztések és publikációk többsége is arra irányul, hogy ezt a problémát áthidalja

3. Heurisztikus (empirikus) módszerek:

- lehetnek lineárisak és nem lineárisak is
- a megoldást a kalibráció során megállapított adatok és a mérési eredmények közötti kapcsolat adja, ami általában empirikusan megállapított
- a kalibráció elvégezhető numerikusan, vagy analitikusan

A képalkotási technikák közül a legegyszerűbb vizsgálat során összefoglaló statisztikát készítenek (minimum és maximum pixel értékek). Statisztikát készíthetnek az egész képről, vagy csak a kép egyik tartományáról. A kép zónákra való osztásával a paraméterváltozások (heterogenitások) válnak szemléletessé (pl. „buborékoltatott oszlop reaktor”, vagy lassú áramlások vizsgálata esetében). Másik lehetséges vizsgálat a keresztkorrelációs vizsgálat, amely során az egymást követő képeket összehasonlítják. A módszerrel információ szerezhetünk a sebességekről keverés, diffúzió vizsgálatánál. [2]

A kiértékelési módszerek szakirodalmában kb. 2010. környékén jelennel meg az olyanok, melyekben az adathalmaz kiértékeléséhez egy új módszerét, a Kalman szűrőt alkalmazzák. Ilyenek a [6], [7], [8], amelyek részletesen is ismertetik a módszert.

4. Az EIT alkalmazhatósága

Az EIT alkalmazásának legfontosabb kritériuma, hogy a vizsgált anyag elektromosan vezessen.

A jelenlegi szakirodalmi összefoglalásokban (pl. [1], [2], [3]) úgy szerepel, hogy amennyiben a módszert kutatáshoz alkalmazzák, vagy adott esetben nincsenek időbeli korlátozások a számításigényes (numerikus) módszereket alkalmazzák a képalkotásra. Erre többféle modell is a rendelkezésre áll.

Ha azonban on-line monitoring tevékenységet kívánunk végezni a módszer segítségével, az adatelemzés sebessége válik a legszűkebb keresztmetszetté. Napjainkban erre a célra lineáris, vagy heurisztikus módszereket alkalmaznak. Itt tulajdonképpen „kompromisszumot kell kötni” a kiértékelendő információ mennyisége és az adatfeldolgozás sebessége között. A legfontosabb cél: lehető leggyorsabb kiértékelési technika kialakítása, minél több kép rögzítése érdekében.

A szakirodalmi kutatásaink során a következő reaktorhidraulikai alkalmazási példákkal ismerkedtünk meg:

- Elektromos ellenállás tomográfia alkalmazása hidraulikus szállító rendszerek lerakódásainak vizsgálatára [10], (1997-ben publikálták);
- Hidrociklon működésének ipari monitoring tevékenysége (ellenállás tomográfia) [11], (1999-ben publikálták)
- Olajleválasztó hidrociklon (olaj/víz szeparátor) működésének monitoring tevékenysége elektromos impedancia tomográfia segítségével (2004-ben publikálták)
- Ülepedő anyagok vizsgálata ülepítés során EIT segítségével [13] (2006-ban publikálták)

- OBR (oscillatory baffled reactor) vizsgálata on-line EIT segítségével [14] (2007-ben publikálták)
- Két sűrű (nagy viszkozitású) folyadék keverésének vizsgálata képalkotással (EIT) [15] (2008-ben publikálták)
- Oldódás (oldás) 3 dimenziós vizsgálata reaktorban EIT segítségével [16] (2010-ben publikálták)

Szakirodalom kutatásaink alapján azt állapítottuk meg, hogy az EIT-vel kapcsolatos kutatások több irányban folynak. Ami a kutatások helyét és idejét illeti, az angliai egyetemek (Leeds, Manchester) végzik az ilyen irányú kutatásokat (és alkalmazásfejlesztéseket) a legtöbb ideje. Ezeken kívül találtunk még publikációkat indiai, USA-beli, dél-koreai, új zélandi, valamint finn szakemberek kutatási munkái nyomán is.

Az alkalmazásfejlesztési publikációink többsége az Egyesült Királyságban működő egyetem szellemi termékei. A publikációkban ismertetett fejlesztési munkák modellkísérletek. Szakirodalom, illetve piackutatásaink során nem találtunk olyan terméket, vagy szolgáltatást, ami EIT monitoring tevékenységet kínálna ipari alkalmazásokhoz. Általánosan azt állapítottuk meg, hogy az EIT technológiája – a nagy számú kutatási munka mellett – még nincs olyan mértékben „kiforrva”, hogy ipari körülmények között alkalmaznák, hiszen az adatelemzési és ábrázolási módszerek meglehetősen lassú és rugalmatlan kiértékelést tesznek lehetővé.

5. Szakirodalom:

- [1] Tomasz Dyakowski, Laurent F.C. Jeanmeure, Artur J. Jaworski: Applications of electrical tomography for gas–solids and liquid–solids flows — a review; Department of Chemical Engineering, University of Manchester, Institute of Science and Technology, PO Box 88, Manchester M60 1QD, UK
- [2] H.S. Tapp, A.J. Peyton, E.K. Kemsley, R.H. Wilson: Chemical engineering applications of electrical process tomography; Institute of Food Research, Norwich Research Park, Colney, Norwich NR4 7UA, UK; Engineering Department, Faculty of Applied Sciences, Lancaster University, Lancaster LA1 4YR, UK
- [3] M. G. Rasteiro¹, R. Silva, F. A. P. Garcia and P. Faia: Electrical Tomography: a review of Configurations and Applications to Particulate Processes; Department of Chemical Engineering, Faculty of Sciences and Technology, University of Coimbra
Department of Electric and Computers Engineering, Faculty of Sciences and Technology, University of Coimbra
- [4] Ramani Duraiswami, Kausik Sarkar, Georges L. Chahine: Efficient 2D and 3D electrical impedance tomography using dual reciprocity boundary element techniques; Dynaflo, Inc., 7210 Pindell School Road, Fulton, MD 20759, USA
- [5] N.S. Mera, D. Lesnic: A boundary element method for the numerical inversion of discontinuous anisotropic conductivities; Centre for Computational Fluid Dynamics, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK, Department of Applied Mathematics, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK
- [6] K.Y. Kim, B.S. Kim, M.C. Kim, S. Kim: Dynamic inverse obstacle problems with electrical impedance tomography; Department of Electronic Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, South Korea, Department of Chemical Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, South Korea, Department of Nuclear and Energy Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, South Korea
- [7] Umer Zeeshan Ijaz, Jeong-Hoon Kim, Anil Kumar Khambampati, Min-Chan Kim, Sin Kim, Kyung-Youn Kim: Concentration distribution estimation of fluid through electrical impedance tomography based on interacting multiple model scheme; Department of Electrical and Electronic Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, Republic of Korea, Department of Chemical Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, Republic of Korea, Department of Nuclear and Energy Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, Republic of Korea
- [8] Umer Zeeshan Ijaz, Anil Kumar Khambampati, Jeong Seong Lee, Sin Kim, Kyung Youn Kim: Nonstationary phase boundary estimation in electrical impedance tomography using unscented Kalman filter, Department of Electronic Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, Republic of Korea, Department of Nuclear and Energy Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, Republic of Korea

- [9] A. Lipponen, A Seppanen, and J. P. Kaipio: Reduced order estimation of nonstationary flows with electrical impedance tomography; Department of Physics and Mathematics, University of Eastern Finland, 70211 Kuopio, Finland, Department of Mathematics, University of Auckland, Auckland, 1142, New Zealand
- [10] Y.S. Fangary, R.A. Williams, W.A. Nell, J. Bond, I. Faulks: Application of electrical resistance tomography to detect deposition in hydraulic conveying systems; Particle and Colloid Engineering Group, Camborn School of Mines, University of Exeter, Redruth, Cornwall TR15 3SE, UK
- [11] R.A. WILLIAMS, X. JIA, R.M. WEST, M. WANG, J.C. CULLIVAN, J.BOND, I. FAULKES, T. DYAKOWSKI, S.J. WANG, N. CLIMPSON, J.A. KOSTUCH and D. PAYTON: INDUSTRIAL MONITORING OF HYDROCYCLONE OPERATION USING ELECTRICAL RESISTANCE TOMOGRAPHY; Centre for Particle & Colloid Engineering, School of Process, Environmental and Materials Engineering, University of Leeds, Leeds, LS2 9JT, UK; Camborne School of Mines, University of Exeter, Redruth, Cornwall, TR15 3SE, UK, Department of Chemical Engineering, UMIST, P.O. Box 88, Manchester M60 1QD, UK, English China Clays International Ltd, John Keay House, St Austell, Cornwall PL25 4DJ, UK
- [12] M.A. Bennett, R.A. Williams: Monitoring the operation of an oil/water separator using impedance tomography; Institute of Particle Science and Engineering, Houldsworth Building, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK
- [13] Olli-Pekka Tossavainena, Marko Vauhkonena, Ville Kolehmainen, KyungYoun Kim: Tracking of moving interfaces in sedimentation processes using electrical impedance tomography; Department of Physics, University of Kuopio, P.O. Box 1627, 70211 Kuopio, Finland, Department of Electronic Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea
- [14] G. Vilar, R.A. Williams, M. Wanga, R.J. Tweedie: On line analysis of structure of dispersions in an oscillatory baffled reactor using electrical impedance tomography; Institute of Particle Science & Engineering, Houldsworth Building, University of Leeds, Clarendon Road, Leeds LS2 9JT, United Kingdom Malvern Instruments Ltd., Enigma Business Park, Grovewood Road, Malvern WR14 1XZ, United Kingdom
- [15] Jari Kourunen, Ritva Käyhkö, Jouni Matula, Jari Käyhkö, Marko Vauhkonen, Lasse M. Heikkinen: Imaging of mixing of two miscible liquids using electrical impedance tomography and linear impedance sensor; Department of Physics, University of Kuopio, Finland, Wetend Technologies Ltd, Kaartilantie 7, FIN-57230 Savonlinna, Finland, Lappeenranta University of Technology, FiberTech-Research Unit, Savonlinna, Finland
- [16] Ville Rimpiläinen, Marko Kuosmanen, Jarkko Ketolainen, Kristiina Järvinen, Marko Vauhkonen, Lasse M. Heikkinen: Electrical impedance tomography for three-dimensional drug release monitoring; Department of Physics and Mathematics, University of Eastern Finland, PO Box 1627, FIN-70211 Kuopio, Finland, School of Pharmacy, University of Eastern Finland, PO Box 1627, FIN-70211 Kuopio, Finland